



*Universidade Federal da Paraíba*

*Centro de Tecnologia*

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**– MESTRADO –**

## **DESEMPENHO ACUSTICO DE UMA PASSAGEM INFERIOR NA ATENUAÇÃO DO RUÍDO DE TRÁFEGO RODOVIÁRIO**

*Por*

***Adalice Flávia Duarte de Medeiros***

*Dissertação de Mestrado apresentada à*

*Universidade Federal da Paraíba para obtenção do grau de Mestre*

**João Pessoa – Paraíba**

**Fevereiro de 2019**



*Universidade Federal da Paraíba*

*Centro de Tecnologia*

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**– MESTRADO –**

## **DESEMPENHO ACUSTICO DE UMA PASSAGEM INFERIOR NA ATENUAÇÃO DO RUÍDO DE TRÁFEGO RODOVIÁRIO**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal da Paraíba, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre.

**Adalice Flávia Duarte de Medeiros**

**Orientador: Prof. Dr. Roberto Leal Pimentel**

**João Pessoa – Paraíba**

**Fevereiro de 2019**

M488d Medeiros, Adalice Flávia Duarte de

DESEMPENHO ACÚSTICO DE UMA PASSAGEM INFERIOR NA  
ATENUAÇÃO DO RUÍDO DE TRÁFEGO RODOVIÁRIO / Adalice  
Flávia Duarte de Medeiros. – João Pessoa, 2019.

114f. il.

Orientador: Prof. Dr. Roberto Leal Pimentel

Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e  
Ambiental - PPGECAM) Campus I - UFPB / Universidade Federal da  
Paraíba.

1. barreira acústica. 2. passagem inferior. 3. ruído de tráfego.  
4. atenuação sonora. 5. modelos de previsão de ruído.  
6. mapeamento sonoro. I. Título.

BS/CT/UFPB

CDU: 2.ed.54(043)

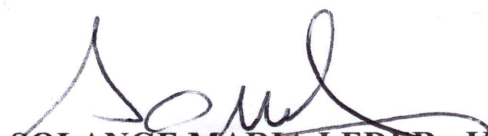
***“DESEMPENHO ACUSTICO DE UMA PASSAGEM INFERIOR NA  
ATENUAÇÃO DO RUÍDO DE TRÁFEGO RODOVIÁRIO”***

**ADALICE FLÁVIA DUARTE DE MEDEIROS**

**Dissertação aprovada em 25 de fevereiro de 2019.  
Período Letivo: 2018.2**



**Prof. Dr. ROBERTO LEAL PIMENTEL - UFPB  
(Orientador)**



**Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. SOLANGE MARIA LEDER - UFPB  
(Membro Interno)**



**Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. BIANCA CARLA DANTAS DE ARAÚJO - UFRN  
(Membro Externo)**

Dedico este trabalho aos pesquisadores que  
irão consultá-lo.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Professor Dr. Roberto Pimentel por sua orientação, críticas e sugestões construtivas que permitiram o bom planejamento e desenvolvimento deste trabalho de pesquisa. Meus agradecimentos são estendidos ao Professor Dr. Ricardo Melo que esteve diretamente envolvido com o projeto.

A Adalcidia, Adaline, Adriane, Beatriz, Bianca, Camila, Diogo, Gabriel, Gabryela, Marcio, Matheus, Natália, Ramoon, Rayff e Roberta que contribuíram com a coleta de dados.

Ao PPGAU/UFRN, representado pela Professora Dra. Bianca Araújo e M<sup>a</sup>. Tamaris Brasileiro, que disponibilizou e auxiliou no uso do *software* de modelagem acústica.

Ao PPGECAU/UFPB e a CAPES pelo auxílio financeiro.

A Deus, minha família e amigos por seu apoio e incentivo durante todo o meu mestrado.

## RESUMO

As Barreiras acústicas são uma das soluções usualmente adotadas na redução do ruído de tráfego. Entretanto, da mesma forma que elas são consideradas um obstáculo ao som, na maioria das vezes, também são percebidas como um obstáculo visual. Sabe-se que passagens inferiores em rodovias vêm sendo usadas para evitar cruzamentos em nível entre as vias. Pressupõe-se que esse desnível pode funcionar como uma barreira acústica, contribuindo com a redução do ruído nas áreas circunvizinhas com a vantagem de possuir pouco impacto visual. Para avaliar o potencial de isolamento da passagem inferior, foram feitas de medições do nível de pressão sonora em pontos de interesse, previsões de ruído com expressões do modelo CoRTN e modelagens computacionais utilizando o *software* SoundPLAN®, que considera a distribuição sonora na área urbana como um todo. O modelo matemático do CoRTN utilizado conseguiu prever o ruído no entorno da passagem inferior e quantificou sua atenuação sonora em 11,8 dB(A). Embora simplificado, tal modelo mostrou ser confiável e possui resultados representativos se comparados a modelagem computacional realizada no SoundPLAN® que quantificou a atenuação sonora em 11,9 dB(A) e 12,4 dB(A). Por fim, após modelados vários cenários com diferentes alturas e com adição de detalhe em “L” na borda, foi comprovado que o uso da passagem inferior possibilita uma atenuação significativa no nível de pressão sonora, confirmando a sua eficiência como uma solução para a minimização do ruído de tráfego.

**PALAVRAS-CHAVE:** barreira acústica, passagem inferior, ruído de tráfego rodoviário, atenuação sonora, modelos de previsão de ruído, mapeamento sonoro.

## **ABSTRACT**

Acoustic barriers are one of the solutions usually adopted to reduce traffic noise. However, as well as being a noise obstacle, they also have a visual impact. It is known that underpasses on highways have been used to avoid at-level intersections between roads. This level difference can act as an acoustic barrier because it contributes to noise reduction in surrounding areas and has the advantage of less visual impact. To evaluate the potential of the noise attenuation due to underpass, noise level measurements at points of interest, noise predictions with CoRTN model expressions and computational modeling of the whole urban area using SoundPLAN® software were carried out. The CoRTN model was able to predict noise in the surroundings of the underpass and quantified its noise attenuation by 11,8 dB(A). This noise prediction model proved to be reliable and has representative results compared to the results obtained by SoundPLAN®, which quantified sound attenuation at 11.9 dB (A) and 12.4 dB (A). Finally, after modeling several scenarios with different heights and adding "L" detail on the edge, it was confirmed that the underpass is effective as a solution to minimize the traffic noise.

**KEYWORDS:** noise barrier, underpass, road traffic noise, sound attenuation, noise model, noise mapping.



# SUMÁRIO

## RESUMO

## ABSTRACT

## LISTA DE FIGURAS

## LISTA DE TABELAS

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
1.1	OBJETIVOS.....	13
1.1.1	<i>Objetivo Geral .....</i>	<i>13</i>
1.1.2	<i>Objetivos específicos.....</i>	<i>13</i>
1.2	HIPÓTESES.....	14
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>15</b>
2.1	GENERALIDADES SOBRE O RUÍDO RODOVIÁRIO.....	15
2.2	PREVISÃO DO RUÍDO DE TRÁFEGO RODOVIÁRIO .....	16
2.3	FORMAS DE ATENUAÇÃO SONORA DO RUÍDO URBANO.....	17
2.4	USO DE PASSAGENS INFERIORES .....	19
2.5	BARREIRAS ACÚSTICAS E SEUS FORMATOS.....	20
2.6	PARÂMETROS QUE AFETAM A ATENUAÇÃO SONORA DE UMA BARREIRA ACÚSTICA .....	24
2.7	IMPACTO VISUAL DAS BARREIRAS ACÚSTICAS .....	27
2.8	MÉTODOS PARA AVALIAR A EFICÁCIA DAS BARREIRAS ACÚSTICAS.....	28
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>31</b>
3.1	ÁREA DE ESTUDO.....	32
3.2	COLETA DE DADOS .....	33
3.2.1	<i>Parâmetros acústicos .....</i>	<i>33</i>
3.2.2	<i>Parâmetros de tráfego .....</i>	<i>36</i>
3.2.3	<i>Parâmetros geométricos .....</i>	<i>37</i>
3.2.4	<i>Período de coleta de dados.....</i>	<i>38</i>
3.3	PROCEDIMENTOS PARA ESTIMATIVAS DO NÍVEL DE PRESSÃO SONORA COM EQUAÇÕES DO CoRTN .....	39
3.4	ESTIMATIVA DO RUÍDO E ELABORAÇÃO DOS MAPAS ACÚSTICOS COM O SOUNDPLAN® .....	43
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>46</b>
4.1	PARÂMETROS ACÚSTICOS .....	46
4.2	PARÂMETROS DE TRÁFEGO .....	47
4.3	CÁLCULO DAS ESTIMATIVAS DO NÍVEL DE PRESSÃO SONORA A PARTIR DO MODELO DO CoRTN .....	49
4.4	CÁLCULO DA ESTIMATIVA DO RUÍDO E ELABORAÇÃO DOS MAPAS ACÚSTICOS UTILIZANDO O SOUNDPLAN® .....	54
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>71</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>74</b>
	<b>APÊNDICE A .....</b>	<b>80</b>
	<b>APÊNDICE B.....</b>	<b>89</b>

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: RESPECTIVAMENTE, BARREIRA DE REFERÊNCIA E BARREIRA COM INSERÇÃO DE FENDAS ( <i>WELLS</i> ); A PROFUNDIDADE DAS FENDAS (DI) VARIOU DE 0 A 0,25M E O NÚMERO DE DIVISÕES (N) VARIOU DE 0 A 9.....	23
FIGURA 2: SEQUÊNCIA SINTÉTICA DOS PROCEDIMENTOS ADOTADOS. ....	31
FIGURA 3: VISTA DA BR-230 QUE ATRAVESSA EM DESNÍVEL O BAIRRO DE TAMBAUZINHO. ....	32
FIGURA 4: PASSAGEM INFERIOR QUE É OBJETO DESTE ESTUDO. ....	32
FIGURA 5: PASSAGEM INFERIOR EM CORTE (MEDIDAS EM METROS).....	33
FIGURA 6: LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE RECEPÇÃO SONORA (MEDIDAS EM METROS).....	34
FIGURA 7: SONÔMETROS DE MODELOS MSL-1354, 1352-C E 2250L, RESPECTIVAMENTE. ....	35
FIGURA 8: VISTA DO POSICIONAMENTO DO MEDIDOR DE VELOCIDADE. ....	36
FIGURA 9: VISTA DO POSICIONAMENTO DA FILMADORA.....	36
FIGURA 10: DIFERENÇA DE PERCURSO DEVIDO A UMA OBSTRUÇÃO. ....	41
FIGURA 11: GEOMETRIA DA BARREIRA VERTICAL, $\varnothing = 0^\circ$ .....	41
FIGURA 12: MODELO DIGITAL DA ÁREA DE ESTUDO. ....	44
FIGURA 13: GRÁFICO COMPARANDO TODOS OS LAEQ EM DB(A) PREVISTOS, REAIS, ATENUAÇÃO E O ERRO. ....	53
FIGURA 14: GRÁFICO COMPARANDO OS LAEQ EM DB(A) COM E SEM BORDA E A ATENUAÇÃO SONORA. ....	60
FIGURA 15: GRÁFICO COMPARANDO OS LAEQ EM DB(A) DO CENÁRIO 2 E CENÁRIO 0.....	61
FIGURA 16: GRÁFICO COMPARANDO OS LAEQ EM DB(A) DO CENÁRIO 2 E CENÁRIO 1.....	62
FIGURA 17: GRÁFICO EVIDENCIANDO O COMPORTAMENTO DA PROPAGAÇÃO DO RUÍDO DA BARREIRA ACÚSTICA SEM BORDA. ....	64
FIGURA 18: GRÁFICO EVIDENCIANDO O COMPORTAMENTO DA ATENUAÇÃO SONORA RUÍDO DA BARREIRA ACÚSTICA SEM BORDA. ....	65
FIGURA 19: GRÁFICO EVIDENCIANDO O COMPORTAMENTO DA PROPAGAÇÃO DO RUÍDO DA BARREIRA ACÚSTICA COM BORDA....	68
FIGURA 20: GRÁFICO EVIDENCIANDO O COMPORTAMENTO DA ATENUAÇÃO SONORA RUÍDO DA BARREIRA ACÚSTICA COM BORDA. ....	69
FIGURA 21: GRÁFICO EVIDENCIANDO O COMPORTAMENTO DA ATENUAÇÃO SONORA MÉDIA EM RELAÇÃO À ALTURA DA BARREIRA. ....	70
FIGURA 22: MAPA ACÚSTICO DO CENÁRIO 0 NO DIA 1. ....	90
FIGURA 23: MAPA ACÚSTICO DO CENÁRIO 0 NO DIA 2. ....	91
FIGURA 24: MAPA ACÚSTICO DO CENÁRIO 0 NO DIA 3. ....	92
FIGURA 25: MAPA ACÚSTICO DO CENÁRIO 0 NO DIA 4. ....	93
FIGURA 26: MAPA ACÚSTICO DO CENÁRIO 0 HOMOGENEIZADO, MÉDIA DO TRÁFEGO. ....	94
FIGURA 27: MAPA ACÚSTICO DO CENÁRIO 1 NO DIA 1. ....	95
FIGURA 28: MAPA ACÚSTICO DO CENÁRIO 1 NO DIA 2. ....	96
FIGURA 29: MAPA ACÚSTICO DO CENÁRIO 1 NO DIA 3. ....	97
FIGURA 30: MAPA ACÚSTICO DO CENÁRIO 1 NO DIA 4. ....	98
FIGURA 31: MAPA ACÚSTICO DO CENÁRIO 1 HOMOGENEIZADO, MÉDIA DO TRÁFEGO. ....	99
FIGURA 32: MAPA ACÚSTICO DO CENÁRIO 2 NO DIA 1. ....	100
FIGURA 33: MAPA ACÚSTICO DO CENÁRIO 2 NO DIA 2. ....	101
FIGURA 34: MAPA ACÚSTICO DO CENÁRIO 2 NO DIA 3. ....	102
FIGURA 35: MAPA ACÚSTICO DO CENÁRIO 2 NO DIA 4. ....	103
FIGURA 36: MAPA ACÚSTICO DO CENÁRIO 2 HOMOGENEIZADO, MÉDIA DO TRÁFEGO. ....	104
FIGURA 37: MAPA ACÚSTICO DO CENÁRIO 3, PASSAGEM INFERIOR COM 4 M DE ALTURA. ....	105
FIGURA 38: MAPA ACÚSTICO DO CENÁRIO 3, PASSAGEM INFERIOR COM 6 M DE ALTURA. ....	106
FIGURA 39: MAPA ACÚSTICO DO CENÁRIO 3, PASSAGEM INFERIOR COM 8 M DE ALTURA. ....	107
FIGURA 40: MAPA ACÚSTICO DO CENÁRIO 3, PASSAGEM INFERIOR COM 10 M DE ALTURA. ....	108
FIGURA 41: MAPA ACÚSTICO DO CENÁRIO 3, PASSAGEM INFERIOR COM 12 M DE ALTURA. ....	109
FIGURA 42: MAPA ACÚSTICO DO CENÁRIO 4, PASSAGEM INFERIOR COM 4 M DE ALTURA. ....	110
FIGURA 43: MAPA ACÚSTICO DO CENÁRIO 4, PASSAGEM INFERIOR COM 6 M DE ALTURA. ....	111
FIGURA 44: MAPA ACÚSTICO DO CENÁRIO 4, PASSAGEM INFERIOR COM 8 M DE ALTURA. ....	112
FIGURA 45: MAPA ACÚSTICO DO CENÁRIO 4, PASSAGEM INFERIOR COM 10 M DE ALTURA. ....	113
FIGURA 46: MAPA ACÚSTICO DO CENÁRIO 4, PASSAGEM INFERIOR COM 12 M DE ALTURA. ....	114

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1: NÍVEL DE PRESSÃO SONORA PARA OS 14 PONTOS, EM DB(A). .....	46
TABELA 2: VALORES HOMOGENEIZADOS (EM DB(A)).....	47
TABELA 3: CARACTERIZAÇÃO DETALHADA DO TRÁFEGO. ....	48
TABELA 4: CARACTERIZAÇÃO DO TRÁFEGO RESUMIDA. ....	49
TABELA 5: CÁLCULO DO $L_{10}$ , CONSIDERANDO A DISTÂNCIA ENTRE A FONTE E O RECEPTOR DE 13,5 METROS.....	49
TABELA 6: RELAÇÃO ENTRE $LA_{eq}$ E $L_{10}$ PARA CADA PONTO MEDIDO POR DIA .....	50
TABELA 7: CORREÇÕES EM DB(A) PARA DIFRAÇÃO E REFLEXÃO. ....	52
TABELA 8: COMPARAÇÃO DE TODOS OS LAEQ EM DB(A) PREVISTOS E REAIS. ....	52
TABELA 9: COMPARAÇÃO DO CENÁRIO 0 EM DB(A) PARA CADA DIA DE MEDIÇÃO, O ERRO ESTÁ EM VALOR ABSOLUTO.....	55
TABELA 10: VALORES HOMOGENEIZADOS EM DB(A) PARA O CENÁRIO 0.....	56
TABELA 11: VALORES CALIBRADOS EM DB(A) PARA CADA DIA DE MEDIÇÃO, O ERRO ESTÁ EM VALOR ABSOLUTO. ....	57
TABELA 12: VALORES HOMOGENEIZADO EM DB(A) PARA O CENÁRIO 1. ....	58
TABELA 13: COMPARAÇÃO DOS LAEQ EM DB(A) COM E SEM BORDA E CÁLCULO DA ATENUAÇÃO.....	59
TABELA 14: VALORES EM DB(A) PARA O CENÁRIO 2. ....	60
TABELA 15: COMPARAÇÃO DOS LAEQ EM DB(A) COM E SEM PASSAGEM INFERIOR, MODELADOS NO SOFTWARE, E CÁLCULO DA ATENUAÇÃO.....	61
TABELA 16: VALORES EM DB(A) PARA O CENÁRIO 3. ....	63
TABELA 17: VALORES EM DB(A) PARA O COMPORTAMENTO DA PROPAGAÇÃO DO RUÍDO.....	64
TABELA 18: VALORES EM DB(A) PARA O COMPORTAMENTO DA ATENUAÇÃO SONORA.....	65
TABELA 19: VALORES EM DB(A) PARA O CENÁRIO 4. ....	66
TABELA 20: VALORES EM DB(A) PARA O COMPORTAMENTO DA PROPAGAÇÃO DO RUÍDO.....	67
TABELA 21: VALORES EM DB(A) PARA O COMPORTAMENTO DA ATENUAÇÃO SONORA.....	68
TABELA 22: VALORES EM DB(A) DA ATENUAÇÃO SONORA MÉDIA. ....	70
TABELA 23: CÁLCULO DO LAEQ PREVISTO DESCONSIDERANDO A EXISTÊNCIA DA PASSAGEM INFERIOR .....	81
TABELA 24: CÁLCULO DO LAEQ PREVISTO DESCONSIDERANDO A EXISTÊNCIA DA PASSAGEM INFERIOR .....	81
TABELA 25: CÁLCULO DO LAEQ PREVISTO DESCONSIDERANDO A EXISTÊNCIA DA PASSAGEM INFERIOR .....	82
TABELA 26: CÁLCULO DO LAEQ PREVISTO DESCONSIDERANDO A EXISTÊNCIA DA PASSAGEM INFERIOR .....	82
TABELA 27: CÁLCULO DA ESTIMATIVA DO RUÍDO APENAS CONSIDERANDO A DIFRAÇÃO DA PRIMEIRA BARREIRA.....	83
TABELA 28: CÁLCULO DA ESTIMATIVA DO RUÍDO APENAS CONSIDERANDO A DIFRAÇÃO DA PRIMEIRA BARREIRA.....	83
TABELA 29: CÁLCULO DA ESTIMATIVA DO RUÍDO APENAS CONSIDERANDO A DIFRAÇÃO DA PRIMEIRA BARREIRA.....	84
TABELA 30: CÁLCULO DA ESTIMATIVA DO RUÍDO APENAS CONSIDERANDO A DIFRAÇÃO DA PRIMEIRA BARREIRA.....	84
TABELA 31: CÁLCULO DA ESTIMATIVA DO RUÍDO CONSIDERANDO A DIFRAÇÃO E A REFLEXÃO DAS BARREIRAS .....	85
TABELA 32: CÁLCULO DA ESTIMATIVA DO RUÍDO CONSIDERANDO A DIFRAÇÃO E A REFLEXÃO DAS BARREIRAS .....	86
TABELA 33: CÁLCULO DA ESTIMATIVA DO RUÍDO CONSIDERANDO A DIFRAÇÃO E A REFLEXÃO DAS BARREIRAS .....	87
TABELA 34: CÁLCULO DA ESTIMATIVA DO RUÍDO CONSIDERANDO A DIFRAÇÃO E A REFLEXÃO DAS BARREIRAS .....	88

## 1 INTRODUÇÃO

Quando um som é excessivo e em níveis superiores aos padrões estabelecidos, convencionou-se chamá-lo de ruído. Ele também é caracterizado como um tipo de som que é constituído pela sobreposição de frequências sem relações harmônicas entre si. Nas grandes cidades, as fontes de emissão de ruído são decorrentes da combinação entre as diferentes fontes sonoras que se propagam no meio urbano (Brüel & Kjær, 2000).

Entre diversas fontes sonoras causadoras de ruído no meio urbano, dedica-se uma atenção especial ao ruído gerado pelos veículos automotivos. Em países como Kosovo com cerca de 1,8 milhões de habitantes, estes são responsáveis por 50% da emissão de ruído produzido pela totalidade de fontes sonoras no meio urbano (Kyçyku et al., 2016). Em geral, ele é considerado mais intrusivo do que outros tipos de ruído. Portanto, o crescimento acelerado das cidades e o aumento da circulação de veículos automotores está diretamente associado ao aumento dos níveis de poluição sonora (Zannin e Sant'ana, 2011). Apesar da importância das rodovias como instrumento de desenvolvimento, a incorporação da variável ruído nos projetos rodoviários só ocorreu no final da década de 1970 nos países desenvolvidos, e no início da década de 1990 nos países da América Latina em geral (Way, 1977; Gil 1992).

Para monitorar o ruído de tráfego, investigações podem ser realizadas para quantificar, avaliar impactos e propor medidas para reduzi-lo. Assim, as coletas de dados a respeito do nível pressão sonora atuante ou levantamento de parâmetros indiretos tais como fluxo e velocidade dos veículos, possibilitam obter indicadores quantitativos sobre o nível local de ruído propagado (Melo et al., 2010; Zannin e Sant'ana, 2011). Para tanto, podem ser utilizados modelos de previsão de ruído como ferramenta de planejamento. Estes modelos são melhores aproveitados durante a concepção de rodovias, nesta fase é possível analisar a necessidade de utilização de equipamentos que mitiguem o ruído (Hothersall e Chandlerwilde, 1987; Chang et al., 2011). No Brasil, ainda não existe um modelo oficial e normatizado para previsão do ruído de tráfego.

Barreiras acústicas são um dos tipos de equipamentos empregados na redução do ruído e tem se tornado uma alternativa bastante usual (Chen *et al.*, 2018). Seu efeito benéfico pode ser estimado usando expressões da literatura, a exemplo das equações contidas no manual

CoRTN (HMSO, 1988) ou por meio de modelagens computacionais. Tais modelagens podem ser feitas por meio de softwares comerciais disponíveis no mercado, tal como o SoundPLAN® (Zhao *et al.*, 2017).

Pesquisas sobre os efeitos de diferentes formas, alturas, espessuras e detalhe do topo de uma barreira dão uma indicação da capacidade das barreiras acústicas de minimizar a transmissão de som (Yuzawa e Sone, 1981; Kim e Yoon, 2015; Oldham e Egan, 2015; Kasess *et al.*, 2016). A altura e o detalhe no topo são variáveis bastante investigadas, pois, sabe-se que elas repercutem diretamente na atenuação sonora.

O desempenho acústico de uma barreira é quantificado a partir das suas propriedades de atenuação do som, ou seja, pelo seu índice de difração e de reflexão sonora (Conter *et al.*, 2009). Variáveis que impactem diretamente em algumas dessas propriedades podem reduzir a atenuação ou eventualmente amplificar o som.

Adicionalmente, o desempenho também varia em função da quantidade de barreiras e do afastamento entre elas. Exemplifica-se pelo efeito gerado pelo uso de pares de barreiras acústicas, ou barreiras acústicas paralelas. O efeito da barreira mais afastada é geralmente prejudicial à atenuação da barreira mais próxima, por conta da reflexão da primeira. (May e Osman, 1980a; Watts, 1996; Muradali *et al.* 1998; Cavalcante *et al.*, 2013).

Da mesma forma que as barreiras acústicas são consideradas um obstáculo ao som, na maioria das vezes, também são percebidas como um obstáculo visual. Para Arenas (2008), elas possuem algumas desvantagens tais como a perda de luz solar e o mencionado impacto visual. Além disso, Jiang e Kang (2016) mostram que as barreiras consideradas mais agradáveis esteticamente apresentaram pouca vantagem em alcançar um melhor desempenho acústico.

Considerando o contexto apresentado, não basta que a barreira cumpra o objetivo principal de atenuar o ruído. Ela deve ser planejada de modo que não provoque impactos secundários, a exemplo do impacto visual.

A barreira acústica urbana, objeto deste estudo, é uma passagem inferior para via de tráfego intenso. Essa passagem inferior foi construída em meados dos anos 70, com o

objetivo de dar lugar para a rodovia (BR-230) atravessar uma área urbana existente. Ordinariamente, as passagens inferiores em rodovias são comumente utilizadas para evitar cruzamentos em nível entre as vias, quer dizer, vêm sendo concebidas como solução para evitar conflito de tráfego. Porém, o seu papel como um equipamento redutor de ruído não vem sendo devidamente investigado. Logo, elas surgem como uma potencial solução para a minimização do ruído sem causar grandes impactos e ainda melhorar o conforto acústico das áreas adjacentes.

Este trabalho propõe avaliar a atenuação acústica de ruído de tráfego em via expressa devido à passagem inferior, visto que os muros de contenção da passagem podem funcionar como barreiras acústicas. Isto se deu por meio de medições do nível de pressão sonora, correlações com expressões da literatura para estimativa do ruído e realização de modelagens computacionais.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo Geral**

Avaliar a atenuação acústica provido por uma passagem inferior para o ruído de tráfego de uma rodovia. Tal passagem é utilizada como meio de escoamento rápido em vias expressas de tráfego, mas seu efeito como barreira acústica ainda não tem sido muito explorado.

### **1.1.2 Objetivos específicos**

- Realizar medições do ruído de tráfego em pontos de interesse para calibrar os modelos de previsão de ruído;
- Simular o ruído de tráfego utilizando modelos matemáticos e modelagem computacional, comparando os resultados obtidos pelos dois métodos;
- Mensurar a atenuação sonora da passagem inferior com base nos valores obtidos pelas simulações;
- Simular cenários com diferentes configurações de altura e adição de borda em “L” na passagem inferior;
- Explorar outra perspectiva para o emprego das passagens inferiores: o uso como barreira acústica;

- Fornecer subsidio para futuras pesquisas sobre novos modelos de barreiras acústicas.

## 1.2 Hipóteses

Para que os objetivos sejam alcançados, algumas hipóteses foram consideradas. Essas hipóteses foram levantadas a partir de dados coletados em estudo anterior (Cavalcanti *et al.*, 2013), analisando outras pesquisas nesta temática e observando os resultados prévios encontrados no início deste trabalho.

- Hipótese 1: Existem modelos matemáticos na literatura capazes de prever o ruído de tráfego e a atenuação sonora em barreiras acústicas. Aplicando as características de uma passagem inferior, tais modelos podem ser usados para prever o ruído no entorno deste equipamento e quantificar sua atenuação sonora.
- Hipótese 2: Em uma modelagem computacional é possível simular a área de estudo semelhante a realidade. Já os modelos matemáticos existentes para prever ruído são simplificados, não consideram algumas variáveis do meio urbano e nem uma geometria que seja mais complexa. Embora simples, tais modelos são confiáveis e possuem resultados representativos comparados a uma modelagem computacional de uma passagem inferior utilizada como barreira acústica.
- Hipótese 3: Barreiras acústicas são muito empregadas para atenuar o ruído do tráfego, porém causam impactos visuais nas áreas circunvizinhas. Em contrapartida, a passagem inferior é realizada em desnível, pois se trata de meio de escoamento rápido para as rodovias sem impactar nas imediações. Embora sejam equipamentos diferentes, eles têm atributos em comum. Estes atributos possibilitam que as passagens inferiores sejam utilizadas como meio de isolamento acústico de ruído de tráfego com o benefício de ter um reduzido impacto visual.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Generalidades sobre o ruído rodoviário

O som se caracteriza por flutuações de pressão em um meio compressível. É a variação da pressão atmosférica ocasionada pela vibração de um determinado material que promove a agitação das moléculas do meio. Esse meio sofre repetidas compressões e expansões que se propagam em forma de ondas, que por sua vez são captadas pelo ouvido humano (Gerges, 2000).

Sabe-se que existem sons que possuem conotação positiva, a exemplo do que Carles *et al.* (1999) demonstraram em seu estudo da influência sonora, cujo os sons advindos da movimentação da água são tidos como de conotação positiva. Existem também sons com conotação negativa, que é quando o som se torna desagradável ao receptor de modo a provocar incômodos ou promover risco para a saúde humana; tal som é denominado como ruído (Gerges, 2000; Bistafa, 2011; Poletto, 2011).

Quando o ruído é excessivo e em níveis superiores aos padrões estabelecidos, é chamado de poluição sonora. Esta poluição compromete o conforto e a saúde humana, além de comprometer a manutenção da biodiversidade ao afugentar e interferir na reprodução da fauna que atua como dispersora genética da flora (Bressane *et al.*, 2010; Halfwerk *et al.*, 2011).

Nos centros urbanos, as fontes de emissão de ruído possuem diversas origens, a título de exemplo, tem-se sons emitidos por bares, automóveis, restaurantes, clubes, indústrias, construções. Ou seja, é decorrente da combinação entre as diferentes fontes sonoras que se propagam no meio urbano (Brüel & Kjær, 2000).

Complementando, destaca-se como fonte de ruído mais preponderante aquele emitido pelo tráfego rodoviário, aéreo e ferroviário. Em geral, o tráfego rodoviário tem um grande impacto ambiental e é considerado mais intrusivo do que outros tipos de ruído (Zannin *et al.*, 2003), já que o aumento dos níveis de poluição sonora está associado com o crescimento acelerado das cidades e o aumento da circulação de veículos automotores (Zannin e Sant'ana, 2011). Este fato ocorre principalmente em países em desenvolvimento.



Way (1977) e Gil (1992) destacam a importância das rodovias como um mecanismo de incentivo ao desenvolvimento, contudo deve-se atentar aos impactos ambientais que sua inserção no meio gera. Em relação ao impacto ambiental causado pelo ruído, esta variável começou a ser considerada nos projetos rodoviários apenas no final da década de 1970 nos países desenvolvidos e no início da década de 1990 nos países da América Latina em geral.

A respeito, Zannin *et al.* (2002) elaboraram uma pesquisa qualitativa aplicada à população de Curitiba e concluíram que o tráfego de veículos é o grande responsável pelo incômodo causado à população, fator que apareceu em 73% das respostas, seguido do incômodo causado por vizinhos em 38% das respostas. Em um estudo realizado por Kyçyku *et al.* (2016) em Kosovo, foi determinado que 81% do ruído no meio urbano é causado por todos os tipos de tráfego (rodoviário, ferroviário e aéreo), destes o ruído de tráfego rodoviário domina com 50% do total.

## **2.2 Previsão do Ruído de tráfego rodoviário**

Para a análise deste tipo de fonte sonora, destaca-se que ela é considerada uma fonte em linha (o eixo da via). O som espalha-se cilindricamente, de modo que o nível de pressão sonora é o mesmo em todos os pontos a uma mesma distância desta linha (Mehta et al., 1999). Acrescenta-se que neste modelo de propagação, o nível de pressão sonora diminui em 3 dB(A) com o dobro da distância (Mehta et al., 1999; Avsar e Gonullu, 2005).

O aumento da distância entre a via de tráfego e os receptores é um redutor do nível de pressão sonora produzido. Porém outras correlações podem ser identificadas: o ruído cresce com o aumento da velocidade e do fluxo de veículos; o ruído produzido por veículos pesados é maior do que o produzido por veículos leves; e o incremento na declividade longitudinal da via intensifica o nível de pressão sonora.

Para controlar o ruído de tráfego, investigações podem ser realizadas para quantificar, avaliar impactos e propor medidas para reduzi-lo. Para obter indicadores que caracterizem as condições locais do ruído faz-se necessário a coleta de parâmetros diretos e indiretos. Os parâmetros diretos são as coletas dos níveis de pressão sonora atuante no local de interesse. Os parâmetros indiretos, tais como fluxo de veículos e velocidade, são utilizados para

estimar o ruído indiretamente quando aplicados a modelos de previsão. (Melo *et al.*, 2010; Zannin e Sant'ana, 2011).

Países europeus como Alemanha, Reino Unido, Suíça, Áustria, França e países escandinavos têm seus próprios métodos para estimar o ruído; cada país determinou individualmente qual método usar para calcular o ruído gerado pelo tráfego rodoviário. Estas metodologias de previsões de ruído tiveram um impulso especial após a Diretiva Europeia sobre Ruído Ambiental 2002/49/CE, que disciplina entre outras questões o uso de mapas acústicos como ferramenta para planejamento e controle do ruído no meio urbano (União Europeia, 2002).

Steele (2001) fez uma revisão crítica de vários modelos de ruído do tráfego. No entanto, com o passar dos anos alguns desses modelos foram revisados e sofreram modificações, e então Garg e Maji (2014) atualizaram tal revisão. A partir destes estudos, são citados alguns dos modelos existentes mais utilizados para previsões de ruído de tráfego: CoRTN (Reino Unido), FHWA (EUA), ASJ RTN (Japão), RLS (Alemanha), NMPB-Routes (França) e Son Road (Suíça).

Acredita-se que o uso desses modelos de previsão de ruído como ferramenta de planejamento tem um papel fundamental na concepção de rodovias que produzam um menor impacto sonoro. Pois, a partir destes modelos é possível estimar a distância que o receptor deve se situar da fonte sonora ou avaliar a utilização de equipamentos que mitiguem o ruído, por exemplo (Hothersall e Chandlerwilde, 1987; Chang *et al.*, 2011).

No Brasil, ainda não existe um modelo oficial e normatizado para previsão do ruído de tráfego. Apesar disso, estudos vêm sendo efetuados com o intuito de verificar a aplicabilidade de diversos modelos de previsão de ruído existentes ao contexto local (Melo *et al.*, 2015) e com o intuito de criar um modelo que represente melhor as características regionais do país (Paz e Zannin, 2009).

### **2.3 Formas de atenuação sonora do ruído urbano**

Para a assimilação do som em um ambiente, 3 (três) etapas ocorrem: a geração pela fonte, a propagação através do meio e a recepção pelo ouvinte. Quando se pretende reduzir

o incômodo causado pela percepção deste som, a intervenção pode ser feita em qualquer etapa, podendo ser em mais de uma, desde a geração pela fonte até a recepção pelo ouvinte (Watts, 2002).

No meio urbano, uma intervenção feita na fonte sonora é possível reduzindo a velocidade máxima dos veículos; e substituindo um revestimento desgastado por um novo, reduzindo o ruído por atrito. Ou ainda, quando é reduzido o fluxo de veículos e por meio da modernização da frota, inserindo veículos elétricos, por exemplo (Ögren *et al.*, 2018).

Esta intervenção na fonte do ruído urbano pode ser exemplificada através dos estudos realizados por Vaitkus *et al.* (2017), os quais estudaram o emprego de pavimentos asfálticos porosos, com o uso deste material durante o atrito pneu-pavimento os veículos emitem menos ruído, já que possuem características que lhe conferem maior absorção sonora.

Uma intervenção na propagação do ruído, segundo Kang (2007), pode ser realizada por qualquer obstáculo sólido que impeça a linha de visão da fonte sonora pelo receptor. A solução mais habitual para este tipo de intervenção é implantando-se barreiras acústicas (Chen *et al.*, 2018).

Além disso, o ITA (1987) aponta que uma outra forma de intervenção na propagação é alocar o tráfego no subsolo das áreas urbanas, utilizando-se tuneis. Este método mostra-se bastante efetivo, porém de custo elevado.

No Brasil, o DNIT (2010) também sugere medidas para redução de ruído. Uma opção mais barata aos túneis são os que ele chama de rodovia enterrada. São vias em desnível que podem ser enterradas entre taludes de cortes ou entre muros de arrimo. São construídas concordando com a topografia local para formar uma barreira natural, de modo a manter uma aparência esteticamente agradável. Em termos de controle de ruídos, ele afirma que afundar uma rodovia possui o mesmo efeito que levantar barreiras, mas nenhum dado quantitativo foi disponibilizado.

## 2.4 Uso de passagens inferiores

Com a crescente demanda pelo modal rodoviário, alternativas para desafogar o tráfego intenso de veículos fazem-se necessárias. Segundo o DNIT (2015a) quando existem problemas decorrentes das interferências entre vias férreas, via rodoviárias ou linhas de serviço públicos ou particulares, uma maneira de minimizar os riscos de acidentes e/ou interrupções dos serviços é fazendo uso de travessias.

Estas travessias podem ser classificadas, quanto a natureza, em: de nível, superior e inferior. Travessias inferiores quando rodoviária, por pedestres ou pela fauna são chamadas de Passagem Inferior (DNIT, 2015a). Em outro manual, o DNIT (2010) também definiu este tipo de equipamento como rodovia enterrada.

Elas são geralmente construídas por estruturas de concreto, tendo a finalidade de eliminar os cruzamentos em nível de modo a proporcionar aos usuários uma travessia segura e confiável. (DNIT, 2015b).

Liao *et al.* (2018) utilizaram a passagem inferior como solução ao congestionamento de quatro vias principais em Shangai; em duas delas foram implementadas passagens inferiores. Relataram que o fluxo de veículos nas vias adjacentes foi reduzido 38% e 78% cada uma; o tempo de deslocamento teve um abatimento de 70%; em compensação, o tráfego no interior das passagens inferiores aumentou 29% e 18% cada.

As passagens inferiores também possuem outros usos: os de cunho ambiental. Com isso, as passagens inferiores também passaram a ser usadas como corredores ecológicos, que são empregadas para minimizar o efeito negativo da fragmentação do habitat e possibilitar a movimentação dos animais e manter a conservação da biodiversidade (Georgii *et al.*, 2011; Jung *et al.*, 2016).

Como já evidenciado no item 2.3, existe o entendimento de que a passagem inferior pode desempenhar o papel de barreiras acústicas (DNIT, 2010), mas carece de fundamentação teórica na literatura validando e quantificando os efeitos acústicos.

Portanto, se observa que passagens inferiores em rodovias são comumente utilizadas para evitar cruzamentos em nível entre as vias, quer dizer, vem sendo concebidas como solução para evitar conflito de tráfego. Porém, o seu papel como barreira acústica não vem sendo devidamente investigado.

## **2.5 Barreiras acústicas e seus formatos**

Pode-se entender barreira acústica como sendo uma infraestrutura composta por material rígido, e com o objetivo de formar um obstáculo físico, evitando a propagação das ondas sonoras entre uma fonte e um receptor.

No que diz respeito às barreiras acústicas urbanas, estas baseiam-se, a grosso modo, em dois princípios básicos para sua concepção. O primeiro princípio envolve a aplicação de materiais absorventes de som na face da barreira voltada para o tráfego. O segundo, e mais abordado neste trabalho, envolve a adoção de diferentes geometrias para a confecção destas barreiras. Em ambos os casos, são relatados abatimentos de ruído mais ou menos significativos na zona de sombra acústica das barreiras.

Convém explicar que a zona de sombra acústica de uma barreira é definida como sendo a região onde o receptor não visualiza a fonte sonora; nesta zona é onde as maiores reduções nos níveis de ruído são registradas (Watts, 2002).

Investigações a respeito das diferentes formas, parâmetros como altura, espessura e detalhe do topo de uma barreira e seus efeitos dão uma indicação da capacidade das barreiras acústicas de minimizar a transmissão de som.

Yuzawa e Sone (1981) desenvolveram um método capaz de prever a atenuação sonora quando são utilizadas barreiras com formatos distintos dos tradicionais (barreiras retangulares). Este método foi elaborado com base nos conceitos de Maekawa (1968) e na teoria da difração de Fresnel-Kirchhoff. Para validá-lo, realizaram estudos comparativos entre os valores calculados por este método e os valores obtidos experimentalmente utilizando exemplares de barreiras em escala reduzida.

Kim e Yoon (2015) fizeram estudos a respeito da geometria ideal para uma barreira acústica em relação à utilização de materiais diferentes para sua confecção: materiais rígidos e porosos. Também fizeram um comparativo no uso de várias formas no topo da barreira para otimizar o desempenho.

Oldham e Egan (2015) fizeram uma pesquisa mais focada na aplicação de barreiras acústicas de modo a esclarecer e facilitar seu entendimento para a prática dos engenheiros rodoviários. Utilizando modelos computacionais, foi avaliado o desempenho de barreiras com diferentes formas de topo e diferentes tratamentos acústicos.

Kasess *et al.* (2016), utilizando o método dos elementos de contorno, simularam o efeito de diferentes geometrias de barreiras e compararam a sua eficiência em relação a uma barreira de forma tradicional (retangular). Foram feitas comparações com diferentes alturas (entre 3 a 8 m), com diferentes espessuras e com diferentes tipos de materiais empregados em sua composição. As fontes sonoras também ficaram a diferentes distâncias horizontais em relação a barreira, no intervalo de 4 a 40 m, e os pontos de recepção sonora variaram em distância horizontal (5 a 150 m) e altura (0 a 10m).

É necessário definir a relação altura/atenuação que seja ideal. Segundo Reiter *et al.* (2017), enquanto a altura é limitada por razões estéticas e econômicas, a forma do perfil deve seguir diretrizes arquitetônicas, estéticas e práticas.

Em seus estudos, Reiter *et al.* (2017) compararam dois métodos para determinar as propriedades acústicas das barreiras, de modo a definir o mais eficiente. Foram realizadas medições acústicas em pontos de interesse e os métodos avaliados foram: as previsões através de cálculos analíticos e simulações pelo método dos elementos finitos. Os cálculos analíticos foram formulados de acordo com as soluções gerais das equações de Helmholtz e, para tornar o cálculo analítico viável, o problema acústico foi limitado a apenas uma dimensão. O cálculo analítico foi eficiente embora este método não tenha conseguido reproduzir os resultados para frequências acima de 2000 Hz. E, como esperado, as simulações pelo método dos elementos finitos apresentaram melhor concordância com as medições acústicas, particularmente para frequências acima de 2000 Hz.

Apesar de, segundo Hendriks *et al.* (2013), não existir uma relação linear entre a atenuação *versus* altura, quanto mais alta for a barreira, maior será a atenuação adquirida. Segundo Knauer *et al.* (2000) via de regra, a cada metro adicional, acima da linha de visão do receptor, ocorre uma atenuação na ordem de 1,5 dB.

Quanto à geometria da barreira acústica, nota-se que ela tem uma influência significativa no seu desempenho acústico. Focando-se mais no detalhe do topo da barreira. Estudos se concentraram neste tema e comprovaram que, em comparação a outras formas de topo, o topo em forma de “T” é o que possui melhor desempenho acústico (May e Osman, 1980b; Hothersall *et al.*, 1991; Watts *et al.*, 1994; Crombie *et al.*, 1995; Fujiwara *et al.*, 1998; Watts, 2002; Ishizuka e Fujiwara, 2004; Baulac *et al.*, 2008; Chen *et al.*, 2018).

Focando apenas nas pesquisas dos últimos 20 anos, tem-se primeiramente Fujiwara *et al.* (1998) que pesquisaram a respeito de um método numérico que calculasse a atenuação de barreiras com diferentes topos: os retangulares, forma de “T” e cilíndrica. Em suas análises, demonstraram que o formato mais eficiente de topo é o em forma de “T”. O estudo objetivou encontrar formas de aumentar a atenuação sonora de uma barreira sem ter que aumentar sua altura, visto que em algumas situações a intrusão visual é um fator importante a ser evitado.

Watts (2002) mediu a atenuação sonora à medida que se aumentava a altura de uma barreira acústica e que um topo em forma em “T” era acrescentado. Ele considerou como cenário inicial uma barreira com 2 m e sem adição de forma ao topo, zerando a atenuação. Todas as outras formas seriam comparadas em relação a esta situação inicial. Quando a altura aumentou de 2m para 3m a atenuação sofreu um adicional de 3,6 dB(A). Adicionando um topo em forma de “T” com 2m de comprimento à barreira de 2m, a atenuação sofreu um adicional de 3,1 dB(A). Verifica-se que adicionar esse topo tem o mesmo efeito de elevar a altura de uma simples barreira plana em quase 1 m.

Ishizuka e Fujiwara (2004) encontraram resultados que confirmaram a tendência dos resultados de Watts (2002). Eles concluíram que barreiras com o topo em forma de “T” são as que produzem maior atenuação; em seus resultados foi constatado que uma barreira de 3m com topo em forma de “T” provoca a mesma atenuação sonora que uma barreira retangular com 10m de altura.

Já sabendo que a borda em forma de “T” é a mais eficiente na atenuação sonora, Baulac *et al.* (2008) buscaram otimizar essa geometria com a inserção de fendas (*wells*) na parte superior (Figura 1). Constataram que a eficiência global de tais barreiras aumenta com o número de fendas consideradas. Em termos numéricos, a melhoria na atenuação global em comparação com a barreira de referência com topo em forma de “T” foi de 2-3 dB (A) para 5-9 fendas.

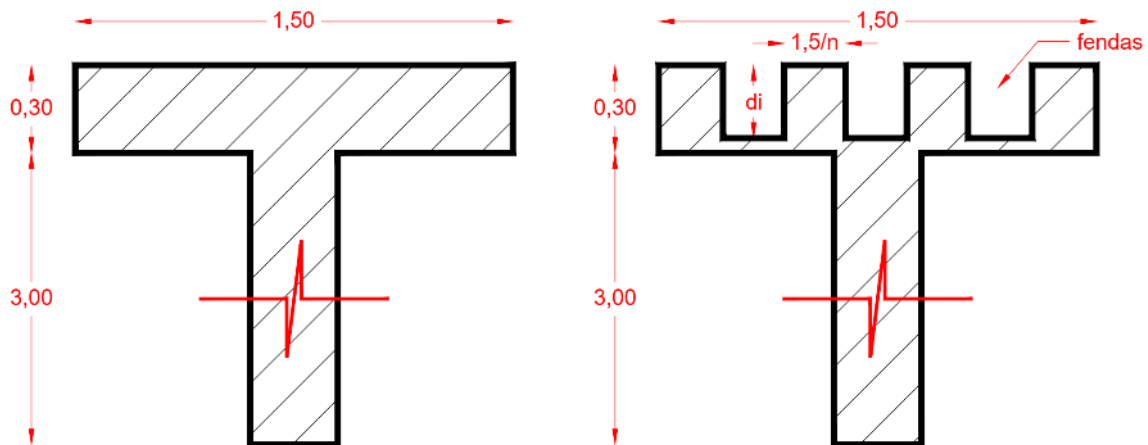


Figura 1: Respectivamente, barreira de referência e barreira com inserção de fendas (*wells*); a profundidade das fendas ( $d_i$ ) variou de 0 a 0,25m e o número de divisões ( $n$ ) variou de 0 a 9.

(Adaptado de Baulac *et al.* (2008)).

As pesquisas avançam de maneira a otimizar essas geometrias. Chen *et al.* (2018) desenvolveram um algoritmo que gera um critério de otimização de barreiras acústicas usado para avaliar variáveis como geometria e material de constituição. Os parâmetros implementados no algoritmo foram baseados em dois métodos: para geometria o Método dos Elementos de Contorno; e para o tipo de material o método do Material Isotrópico Sólido com Penalização. Para validar a eficiência deste algoritmo, exemplares de barreiras foram testados por múltiplas interações até resultar na solução ótima, validando o método. A solução ótima, para este caso, é quando a média das atenuações convergem para um valor máximo e estabilizam, a cada interação. Os tipos de barreiras utilizadas foram: barreiras acústicas com topo em forma de "T" e barreiras com inserção de duas fendas na parte superior.



Logo, percebe-se que aumentar a altura de uma barreira é uma das maneiras de aumentar sua eficiência, entretanto devido a limitações estéticas, construtivas e financeiras não é benéfico construir barreiras muito altas (Duhamel *et al.*, 1998; Naderzadeh *et al.*, 2011). A maior parte dos estudos convergem para uma mesma alternativa a essa limitação de altura: aplicar detalhes no topo que possibilitam uma redução adicional na propagação sonora (Chen *et al.*, 2018).

No Brasil, estudos analisando os formatos de barreiras acústicas não vêm sendo realizados. Quanto a normatizações, existia a NBR 14313 (ABNT, 1999), que estabelecia as condições exigíveis para os materiais e para a instalação de barreiras acústicas em vias de tráfego. Em maio de 2016 ela foi cancelada e não foi substituída por nenhuma outra norma.

## **2.6 Parâmetros que afetam a atenuação sonora de uma barreira acústica**

A performance de uma barreira acústica é avaliada através da sua capacidade de atenuação sonora. Por sua vez, a atenuação sonora é quantificada através dos índices de difração e reflexão (Conter *et al.*, 2009).

Para o índice de difração, uma referência são os estudos de Kurze e Anderson (1971). Eles calcularam a atenuação sonora devido à difração e estimaram o comprimento requerido de uma barreira para que seja eficiente para fontes sonoras em linha. Também realizaram análises acerca de zonas iluminadas e zonas de sombra acústica, assim como Seznec (1980), que estudou o ruído difratado por barreiras de diferentes formatos.

Quanto à reflexão, tem-se que May e Osman (1980b) estudaram as configurações reflexivas de barreiras com geometrias diferentes. Crombie *et al.* (1995), por sua vez, analisaram uma maneira de minimizar o som refletido; e Watts (1996) estudou o efeito do som refletido pela barreira oposta quando são usadas barreiras paralelas.

Fatores externos podem influenciar diretamente na eficiência de uma barreira acústica em atenuar o som. Para Scholes (1971), estes fatores externos são: o efeito do vento, temperatura, tipo de solo que está sob a barreira e absorção do ar. Ele acrescenta que para minimizar esses efeitos, a fonte sonora deve estar suficientemente próxima da barreira.

Para uma barreira de ruído de tráfego disposta ao longo da borda da rodovia, fatores externos são minimizados pois as barreiras acústicas são localizadas próximas a fonte ruidosa. Alguns dos fatores que incidem de maneira mais preponderante na eficiência da barreira são: a geometria (abordada no item 2.5); a maneira como são organizadas; e onde é a localização do receptor.

Quanto à organização das barreiras tem-se o caso do uso de barreiras paralelas. Evidencia-se que o efeito de pares de barreiras nem sempre é benéfico

May e Osman (1980a) tiraram conclusões a respeito de barreiras paralelas. Em comparação com a atenuação provocada por uma única barreira, quando quantificado a atenuação acústica provocado por pares de barreiras acústicas paralelas constatou-se que existe uma amplificação do som na ordem de 1 a 5 dB (A). Vale ressaltar que esses estudos foram feitos apenas com fontes sonoras pontuais.

Watts (1996), em relação ao uso de uma única barreira com as mesmas características, observou que os valores atenuados a partir do uso barreiras paralelas com 3 m de altura são reduzidos em 3,9 dB(A) para fontes pontuais e 5,4 dB(A) para fontes em linha. Concluiu que quando barreiras acústicas são colocadas em ambos os lados de uma rodovia o ruído refletido em ambas as barreiras faz uma contribuição negativa no ruído atenuado. Para minimizar este efeito, barreiras inclinadas opostas as fontes sonoras ou barreiras absorventes foram consideradas eficazes para neutralizar a redução no desempenho ocasionado pela reflexão sonora entre pares de barreiras.

Dentre outras análises, Muradali *et al.* (1998) estudaram o efeito de barreiras paralelas com 3m de altura e distantes 15 m e 30 m uma da outra. Foi utilizada uma única fonte sonora em linha alocada equidistante das duas barreiras. As que distavam 30 m exibiram uma melhor atenuação devido à configuração menos fechada e, portanto, com menos efeito da reflexão. Para 30 m, observou-se que a atenuação sonora reduziu 3 dB(A) em relação ao uso de uma única barreira. Quando a distância entre as barreiras foi de 15 m a atenuação sonora reduziu em 5 dB(A).

Cavalcante *et al.* (2013) avaliaram a atenuação de uma passagem inferior, que foi considerada como sendo um tipo de barreiras paralelas. Vizinho ao topo da barreira, em zona

iluminada acusticamente, a amplificação do ruído causado pela reflexão das barreiras foi superior ao ruído atenuado devido à difração em 5 dB (A). As barreiras estão a 22,41 m de distância umas das outras e existiam 4 fontes sonoras em linha atuando (quatro faixas de tráfego).

Outro estudo nesta temática foi o de Tadeu *et al.* (2012), relacionado à propagação do som na vizinhança de barreiras acústicas colocadas em paralelo com fachadas de edifícios, de modo a mitigar a propagação do ruído. Simularam diferentes geometrias e avaliaram a influência destas características na atenuação sonora. Concluíram que a interação entre as ondas incididas diretamente nos receptores, as ondas difratadas no topo da barreira e as refletidas no pavimento, conduzem a uma diminuição do desempenho da barreira. Como solução para o problema, sugeriram a utilização de barreiras onduladas longitudinalmente.

Quanto à localização do receptor, os estudos constataram comportamentos diferentes se o receptor estiver localizado na zona iluminada ou na zona de sombra acústica. Pontos localizados dentro da zona de sombra acústica são os nos quais a barreira pode prover maiores atenuações sonoras. (Crombie *et al.*, 1995; Cianfrini *et al.*, 2007; Yang *et al.*, 2013).

Crombie *et al.* (1995) estudaram o comportamento na atenuação acústica quando eram inseridas múltiplas bordas. Para suas análises, os receptores foram alocados apenas na zona de sombra acústica pois nesta região são onde os resultados para a atenuação são mais representativos. Para eles, resultados coletados a partir de pontos na zona de sombra acústica podem ser usados como medida de eficiência e tem se mostrado um bom indicador do desempenho geral da barreira.

Em Cianfrini *et al.* (2007), utilizando pares de barreiras acústicas com propriedades difusivas, foi detectado benefícios na atenuação do ruído não apenas na zona de sombra atrás das barreiras, mas também na zona desprotegida imediatamente acima das barreiras. Barreiras difusivas são obtidas quando a superfície em contato com a fonte sonora é irregular e rugosa. Verificaram que as barreiras acústicas difusas podem efetivamente ajudar a contrabalançar os múltiplos efeitos de reflexão de barreiras paralelas.

Por fim, Yang *et al.* (2013) observaram que na face da barreira que fica do lado do receptor, existe uma zona de sombra onde somente as ondas difratadas pelo topo da barreira

podem chegar. Afirmaram que a principal função de uma barreira é proteger o receptor dentro de uma zona de sombra acústica. Com base nisto, compararam diferentes barreiras de modo a verificar qual possuía uma melhor atuação na zona de sombra acústica. Os resultados mostraram que a barreira inclinada contrária à fonte sonora tem um desempenho melhor que o da barreira retangular na zona de sombra.

## **2.7 Impacto visual das barreiras acústicas**

Da mesma forma que as barreiras acústicas são consideradas um obstáculo ao som, na maioria das vezes, também são percebidas como um obstáculo visual.

Apesar da vantagem em atenuar o ruído de tráfego, as barreiras acústicas possuem algumas desvantagens. Segundo Arenas (2008) as desvantagens no uso de barreiras acústicas estão associadas com: a perda de luz solar e o impacto visual. Perfater (1979) aponta que as barreiras acústicas têm uma influência negativa em aspectos sociais e econômicos. Tais aspectos são associados com aumento da criminalidade e mudanças no valor de imóveis localizados adjacentes à barreira.

Para contornar essa situação, estudos foram realizados de modo a conceber barreiras mais agradáveis esteticamente. Seguindo este argumento, Hong e Jeon (2014) estudaram o grau de satisfação no uso de diferentes barreiras e seus resultados mostraram que a barreira com vegetação era a mais preferível, seguida de barreiras de concreto cobertas com vegetação e madeira. Porém, Jiang e Kang (2016) mostraram que as barreiras consideradas mais agradáveis esteticamente tiveram pouca vantagem em alcançar um melhor desempenho acústico.

No Brasil, a primeira barreira acústica foi construída em 1999 na Rodovia dos Bandeirantes, no estado de São Paulo, com 200 metros de comprimento. Chaves *et al.* (2012) expõe que com a instalação desta barreira o nível de pressão sonora naquela área sofreu reduções da ordem de 8 dB a 10 dB. Em 2010, iniciou-se a instalação de uma barreira na Via Expressa Presidente João Goulart, no estado do Rio de Janeiro, com o objetivo de reduzir o nível de pressão sonora incidente nos moradores próximos à via. Após sua conclusão em 2014, sofreu diversas críticas em relação ao impacto visual e aumento da criminalidade no entorno.

Logo, não basta que a barreira cumpra seu objetivo principal que é o de atenuar o ruído. Ela deve ser planejada de modo que não provoque impactos secundários, a exemplo do impacto visual.

## **2.8 Métodos para avaliar a eficácia das barreiras acústicas**

Para avaliar a eficácia de barreiras acústicas, pode-se utilizar o princípio chamado de perda por inserção (*insertion loss - IL*). Perda por inserção, também chamada de atenuação sonora, é definida como diferenças entre os níveis de pressão sonora medidos em um ambiente com e sem barreiras acústicas (Van Haaren e Van Tol, 2000).

Existe uma norma internacional que auxilia na determinação da atenuação sonora, a ISO 10847 (ISO, 1997). Esta Norma Internacional define métodos que possibilitam determinar a atenuação sonora em diferentes cenários. Um destes cenários é aquele em que a barreira já está instalada no local e não existem dados de ruído antes da sua instalação. Portanto, para que se calcule a atenuação sonora neste cenário utiliza-se um método indireto de cálculo que utiliza dados coletados a partir de simulações da situação inicial sem barreira.

No Brasil, até o presente momento não foi encontrada nenhuma norma brasileira vigente que defina parâmetros para o cálculo da atenuação sonora por barreiras acústicas.

O desempenho da barreira será considerado eficiente se a perda por inserção for positiva e será considerado ineficiente em caso contrário, isto é, se o valor do nível de pressão sonora medido no ponto do receptor for superior ao nível de pressão sonora emitido pela fonte, sem a presença da barreira.

A perda por inserção é calculada, segundo a Equação 1, pela diferença do nível de pressão sonora, medido em um mesmo ponto, antes e depois da construção de uma barreira acústica:

$$IL = L_p(\text{antes}) - L_p(\text{depois}) \quad \text{Equação 1}$$

Para determinação da eficácia de barreiras acústicas pode-se utilizar dados coletados em medições *in situ*, bem como dados adquiridos via modelagens matemáticas ou computacionais (Baltrėnas *et al.*, 2010; Venckus *et al.* 2012).

Baltrėnas *et al.* (2010) avaliaram a eficiência de uma barreira acústica existente em uma área rural, tanto com medidas no local quanto com modelagens computacionais e cálculos matemáticos.

Venckus *et al.* (2012) realizaram medições que estimaram o impacto que a inclinação da borda superior de uma barreira acústica tem em relação ao seu desempenho na atenuação do ruído urbano. Utilizaram um protótipo de tamanho real no qual a borda era móvel, sendo inclinada conforme a necessidade da pesquisa.

Alguns modelos matemáticos que auxiliam na previsão do ruído e podem ser usados para calcular, indiretamente, a atenuação sonora foram apresentados no item 2.2. Quanto as modelagens computacionais, estas são desenvolvidas de modo a obter mapas acústicos que representem mais fielmente a área analisada.

Mapas acústicos são ferramentas utilizadas para auxiliar a gestão no meio urbano. Permitem a simulação de vários cenários, a adição de várias variáveis e os cálculos realizados são menos simplificados. Os resultados são recebidos de maneira mais rápida, pois realizam cálculos que manualmente seriam exaustivos. Recomenda-se mapas em 2D (2 dimensões) para áreas pouco adensadas onde a maioria das edificações não são altas e mapas em 3D para as demais situações. Algumas ferramentas comerciais estão disponíveis para o desenvolvimento desses mapas de ruído, tais como: CadnaA®, SoundPLAN® e LimA® (Zhao *et al.*, 2017).

Os mapas de ruído, que oferecem a possibilidade de fazer previsões sobre o futuro (ou até mesmo o passado), são considerados uma ferramenta muito útil no planejamento de zonas de desenvolvimento urbano e na determinação das rotas e locais apropriados para estradas ou outras fontes de ruído urbano (İlgürel *et al.*, 2016).

No Brasil, pode-se citar algumas pesquisas que utilizaram mapas acústicos para analisar medidas que ajudem a mitigar o ruído de tráfego, a citar, por exemplo, os trabalhos

de Paz e Zannin (2009) e Belderrain *et al.* (2015). Ambas contaram com o auxílio do SoundPLAN® no desenvolvimento das investigações.

Paz e Zannin (2009), realizaram uma modelagem de um trecho da BR-476 que atravessa a cidade de Curitiba/PR. Os resultados obtidos através da modelagem constataram que esta rodovia causa poluição sonora, pois os níveis de ruído ultrapassam os limites normativos. Apresentaram medidas para mitigar essa poluição, entre elas a utilização de barreiras acústicas. Utilizando as barreiras acústicas os ruídos emitidos pela rodovia seriam percebidos pelos receptores em níveis abaixo de 50 dB(A).

Já Belderrain *et al.* (2015) realizaram uma simulação sonora realizada em trecho do Rodoanel Norte, em São Paulo. Foi verificado se ocorreria impacto sonoro no entorno devido à implementação deste novo trecho. Foram realizadas medições de ruído em pontos no local de modo a permitir a calibração do modelo. Após confirmado o impacto sonoro, pois os valores de ruído obtido ultrapassaram os limites impostos pela legislação, medidas mitigadoras foram avaliadas. Na simulação foram testados vários tipos de pavimento para verificar sua influência na emissão de ruído, bem como indicados os trechos que necessitariam de proteção por barreiras acústicas. São indicadas quais partes do trecho necessitam de barreiras acústicas, além de definir a altura necessária para serem capazes de mitigar o ruído proveniente do trecho viário.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Em síntese, esta pesquisa baseia-se na hipótese de que uma passagem inferior pode ser potencialmente utilizada com uma barreira acústica. Foi realizada pesquisa bibliográfica acerca de barreiras acústicas com características geométricas e propriedades de propagação sonora semelhantes, para fundamentar o desenvolvimento deste trabalho. A partir deste embasamento teórico, foram definidas etapas que visam validar a hipótese apresentada. Foram realizadas coleta de dados *in loco* de ruído, características geométricas e dados de tráfego; realizaram-se previsões de ruído através de modelagem computacional e utilizando de equações analíticas; e compararam-se todos estes resultados de modo a determinar quantitativamente a atenuação acústica devido à passagem inferior. A sequência de procedimentos adotados é apresentada sumariamente na Figura 2.

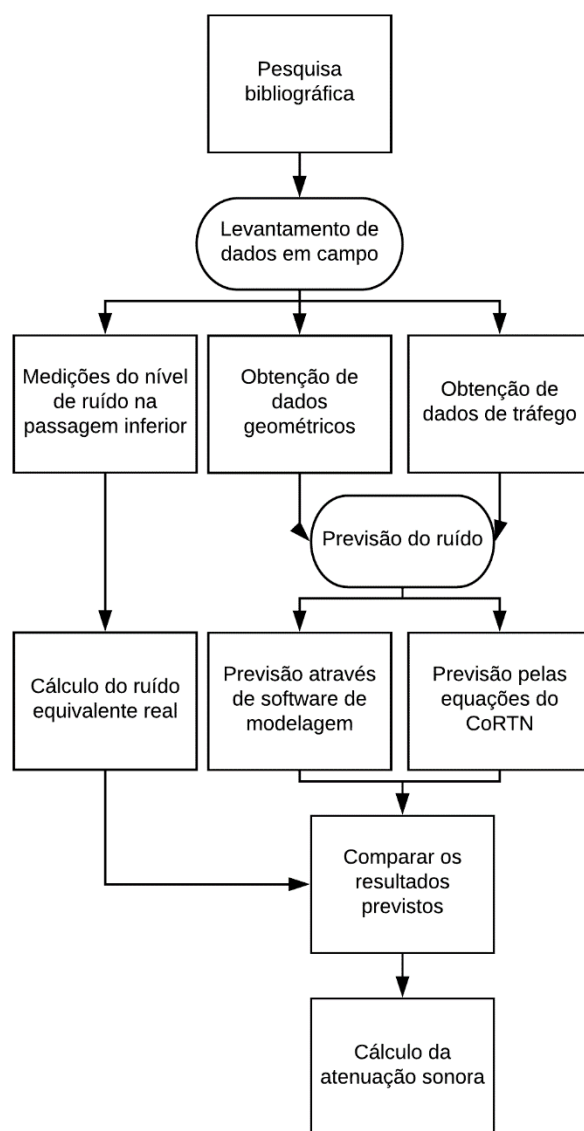


Figura 2: Sequência sintética dos procedimentos adotados.



### 3.1 Área de estudo

A área de estudo localiza-se no bairro Tambauzinho, cidade de João Pessoa/PB. Tal bairro é predominante residencial e a maior parte das edificações são térreas; abrigando uma população de classe média e não possui uma verticalização intensa (vide Figura 3). Este local foi escolhido por ser cruzado por uma rodovia, a BR-230, que atravessa o bairro por uma passagem inferior em desnível significativo com as áreas residenciais circunvizinhas (Figura 4).



Figura 3: Vista da BR-230 que atravessa em desnível o bairro de Tambauzinho.



Figura 4: Passagem inferior que é objeto deste estudo.

A rodovia (BR-230) é composta por quatro faixas de tráfego, duas para cada sentido, que juntamente com os acostamentos laterais e canteiro central compreende uma largura de 22,41 metros. O desnível entre as faixas de rodagem da rodovia e o pavimento das ruas adjacentes à passagem inferior é de 8,37 metros no trecho em estudo (Figura 5).

A BR-230, também conhecida como transamazônica, foi construída na década de 70 com o objetivo de ligar os Estados da Paraíba e Pernambuco a Lima, no Peru (Tamer, 1970). Inaugurada em agosto de 1972, com 4.223 km de distância, a estrada percorre sete Estados brasileiros: Paraíba, Ceará, Piauí, Maranhão, Tocantins, Pará e Amazonas (Oliveira Neto, 2013). Foi pensada para que o tráfego da rodovia não interferisse no trânsito local dos bairros vizinhos.

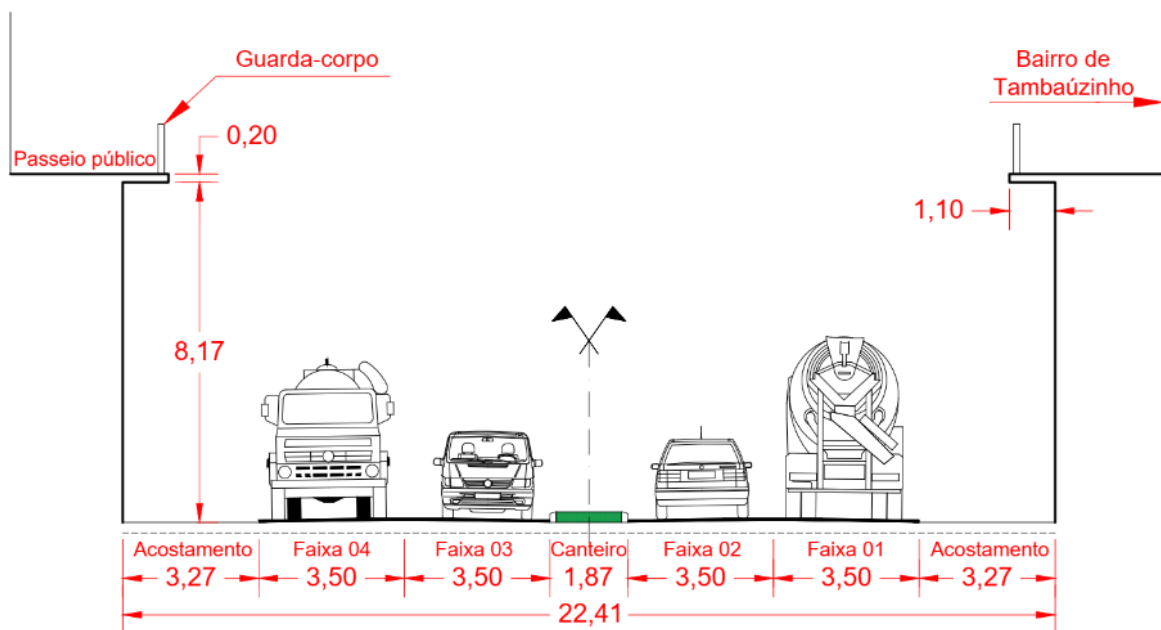


Figura 5: Passagem inferior em corte (medidas em metros).

## 3.2 Coleta de dados

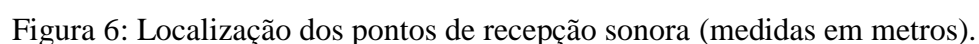
### 3.2.1 Parâmetros acústicos

Para a coleta dos parâmetros acústicos foram definidos 14 pontos de recepção localizados ao longo de vias adjacentes à passagem inferior. Estes pontos foram dispostos ao longo de duas vias locais que não possuíam um tráfego intenso no período do levantamento destes dados. Evitar interferências do ruído de tráfego de outras vias foi necessário pois o objetivo era apenas coletar o ruído oriundo da BR-230.

O critério de escolha para a localização destes pontos de recepção foi com base no princípio da propagação sonora para fontes em linha, princípio aplicado ao ruído de tráfego. Para uma fonte sonora linear, Mehta *et al.* (1999) explicam que, neste caso, o nível sonoro espalha-se cilíndricamente de modo que o nível de pressão sonora é o mesmo em todos os

Em uma mesma via, os pontos foram posicionados com distâncias em relação a passagem inferior que variavam de 0 m a 227,9 m, e com afastamentos entre eles aproximadamente duplicados em relação ao afastamento imediatamente anterior. Em vias diferentes, via de regra, os pontos eram correspondentes entre si, de modo que entre eles haviam pontos a uma mesma distância em relação a passagem inferior.

A planta da Figura 6 foi confeccionada a partir dos mapas disponibilizados no site da Prefeitura de João Pessoa, intitulado JampaMapas (João Pessoa, 2016). Nele contém os locais onde foram realizadas todas as medições com suas respectivas distâncias e numerações.



Percebe-se que há uma quebra na numeração dos pontos onde foram feitas as coletas do nível de pressão sonora. Isso ocorreu pois durante a coleta percebeu-se que alguns pontos não mais representavam o ruído emitido pela BR-230, logo foram descartados. Em contrapartida sentiu-se a necessidade de adicionar mais pontos de interesse próximo à BR-230, logo eles foram acrescentados. Desta forma foi possível selecionar uma gama de pontos que poderá coletar com precisão o ruído emitido pela BR-230.

Para coletar o nível de pressão sonora foram utilizados os sonômetros (Figura 7): Minipa classe 2 (modelos MSL-1354 e 1352-C) e B&K classe 1 (modelo 2250L). Eles eram acoplados em tripés a uma altura padrão estipulada em 1,30 m e foram levemente inclinados para cima, atendendo as exigências da NBR 10151 (2000).



Figura 7: Sonômetros de modelos MSL-1354, 1352-C e 2250L, respectivamente.  
(Fonte: Minipa e B&K)

Para obter o nível de pressão sonora equivalente a partir dos valores de ruído coletados, se utiliza a Equação 2 abaixo:

$$LA_{eq} = 10 \log \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{L_i/10} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

$LA_{eq}$  = Nível de pressão sonora equivalente, em dB(A),

$L_i$  = é o nível de pressão sonora referente a cada leitura, em dB(A),

$n$  = é o número total de leituras.

### 3.2.2 Parâmetros de tráfego

As coletas dos parâmetros do tráfego da BR-230 foram realizadas simultaneamente com a coleta dos parâmetros acústicos. Os parâmetros de tráfego coletados foram: fluxo de veículos, composição da frota e velocidade média.

Esses parâmetros são necessários para que sejam realizadas as estimativas do ruído do tráfego. Tanto as previsões de ruído através de modelagem computacional quanto por modelos matemáticos que simulam o ruído, utilizam destes parâmetros.

Para isso, utilizou-se um radar de velocidade portátil Bushnell e uma filmadora digital Sony modelo DCR-DVD610. Estes equipamentos foram colocados em viaduto sobre a BR-230, em local próximo às medições e captando o mesmo tráfego. Na Figura 8 e Figura 9, pode-se observar seu posicionamento.



Figura 8: Vista do posicionamento do medidor de velocidade.



Figura 9: Vista do posicionamento da filmadora.

Com a filmadora, realizou-se filmagens durante todo o período de coleta. A partir destas imagens obteve-se a contagem do tráfego para cada faixa de tráfego, separando os veículos em automóveis, motocicletas e veículos pesados.

Para obtenção das velocidades, o procedimento consistiu em capturar a velocidade dos veículos durante o período de coleta. Os veículos foram catalogados de acordo com o seu tipo e, posteriormente, calculou-se a velocidade média por faixa a partir da média aritmética dos dados coletados.

Salienta-se que o procedimento adequado para a coleta da variável velocidade é obtê-la de maneira frontal e nivelada com o veículo. Diante da impossibilidade em realizar este procedimento conforme esta recomendação, a estratégia consistiu em coletar este dado no viaduto supracitado e aplicar um fator de correção.

O fator de correção é demonstrado na Equação 3. Sua obtenção consistiu em realizar a comparação entre a velocidade real de veículo de teste (conforme marcada por seu velocímetro) e a velocidade capturada pelo equipamento quando tal veículo circulava pela via. Este procedimento foi repetido para uma faixa de velocidades entre 50 e 80 km/h, conduzindo à mesma relação entre tais velocidades, dada pela Equação 3.

$$V_{corrigida} = \frac{V_{Medida}}{0,89} \quad \text{Equação 3}$$

### 3.2.3 Parâmetros geométricos

Para este estudo os parâmetros geométricos necessários foram: largura das vias e acostamentos da BR-230, altura do talude da passagem inferior, distância entre os pontos de recepção sonora, altura dos pontos de recepção em relação ao solo, altura das edificações na área de estudo e topografia da região.

Esses parâmetros foram coletados *in loco* com auxílio de equipamentos de medição, a partir de plantas disponibilizadas pela Prefeitura Municipal de João Pessoa (PMJP) e confrontados com os dados disponibilizados pelo Google Earth®.



### 3.2.4 Período de coleta de dados

Para o período de coleta dos dados elencados nos itens 3.2.1, 3.2.2 foram definidos dias da semana e horários. As medições foram realizadas logo após o horário de pico, de 08:20-08:45h a 09:20-09:45h, em quartas-feiras e quintas-feiras.

O critério de escolha foi definido com base em contagens volumétricas classificatórias realizadas em trabalhos anteriores na cidade de João Pessoa (Pimentel *et al.*, 2007; Melo *et al.*, 2010; Cavalcanti *et al.* 2013; Melo *et al.*, 2015) e através de informações disponibilizadas no órgão de trânsito municipal.

Dentro deste período, o número de veículos em circulação é intenso em função do horário e por se tratar de uma via expressa importante para a cidade. Porém, por terem sido realizados logo após o horário de pico, o fluxo é constante e sem interrupções.

Para coleta dos parâmetros de tráfego, uma única medição com uma hora de duração foi realizada de forma ininterrupta.

Para a coleta dos parâmetros acústicos, quatro medições cada uma com duração de cinco minutos foram realizadas dentro do período de uma hora; foram dados intervalos de dez minutos entre cada medição. A adoção deste procedimento não induziu a perda de representatividade das medições e o mesmo método foi aplicado em estudos anteriores. Pimentel *et al.* (2007), Melo *et al.* (2010), Cavalcanti *et al.* (2013) e Melo *et al.* (2015) observaram que tal duração já seria suficiente para caracterizar o ruído produzido, com pequena flutuação entre as coletas.

Por fim, diante da quantidade insuficiente de equipamentos que colem o ruído simultaneamente dos 14 pontos selecionados, as medições foram particionadas. Então, repetiu-se o procedimento por quatro dias de modo a atender os 14 pontos. Para equalizar os valores coletados nestas medições particionadas, um ponto de controle foi definido e deste ponto foram coletados dados em todas as medições. Com ele foi possível homogeneizar os resultados obtidos e verificar se houve alguma variação expressiva entre os dados coletados nos diferentes dias medidos.

### 3.3 Procedimentos para estimativas do nível de pressão sonora com equações do CoRTN

Para estimar o nível de pressão sonora analiticamente, fez-se uso das equações do CoRTN (HMSO, 1988). Foi avaliado, inicialmente, o ruído proveniente da BR-230 sem a presença de barreiras acústicas e, posteriormente, o ruído com a presença de uma barreira acústica com atributos semelhantes ao da passagem inferior existente.

A estimativa realizada considera velocidades constantes de tráfego e faz uso de modelos matemáticos de propagação sonora. Estes modelos levam em conta a atenuação da propagação sonora devido as barreiras acústicas.

Tem-se a Equação 4, que estima o nível de pressão sonora de tráfego para uma distância de 13,5 m entre a fonte sonora e o ponto de recepção:

$$L_{10} = 10 \log q + 33 \log\left(v + 40 + \frac{500}{v}\right) + 10 \log\left(1 + \frac{5p}{v}\right) - 26,6 \text{ (dBA)} \quad \text{Equação 4}$$

Em que:

- $q$ : fluxo de veículos em duas faixas de rodagem [veíc./h];
- $v$ : velocidade média dos veículos [km/h];
- $p$ : percentual de veículos pesados em relação ao tráfego total [%];
- $L_{10}$ : nível de pressão sonora ultrapassado por 10% dos valores no intervalo de medição.

Os valores obtidos foram posteriormente convertidos para o nível de pressão sonora equivalente  $L_{eq}$ , utilizando-se a relação entre  $L_{10}$  e  $L_{eq}$  obtida das próprias medições, a ser apresentada posteriormente.

A Equação 5 faz uma correção do ruído para distâncias, entre a fonte e o receptor, diferentes de 13,5m.

$$\Delta L = -10 \log\left(\frac{\sqrt{(d + 3,5)^2 + h^2}}{13,5}\right) \quad \text{Equação 5}$$



Em que:  $d$ : é a distância entre o ponto de recepção e a borda da faixa de rolamento mais próxima [m];  
 $h$ : é a altura entre o ponto de recepção em relação à altura da fonte sonora; o modelo considera que a fonte sonora se encontra a 0,5 m do solo [m]

A Equação 6 relaciona a diferença de percurso devido a uma obstrução (Figura 10).

$$\delta = SB + BR - SR \quad \text{Equação 6}$$

Em que:  $SB$ : distância entre a fonte de ruído e a borda da barreira [m];  
 $BR$ : distância entre a borda da barreira e o ponto de recepção [m];  
 $SR$ : distância entre a fonte de ruído e o ponto de recepção [m].

A correção do ruído difratado, atenuação devido à difração da barreira próxima, foi feita conforme a localização do ponto de recepção. Caso o ponto de recepção esteja na zona iluminada (ZI) utiliza-se a Equação 7; caso se situe na zona sombreada (ZS) utiliza-se a Equação 8.

$$\text{Correção}_{ZI} = 0,109x - 0,815x^2 + 0,479x^3 + 0,3284x^4 + 0,04385x^5 \quad \text{Equação 7}$$

$$\begin{aligned} \text{Correção}_{ZS} = & -15,4 - 8,26x - 2,787x^2 - 0,831x^3 - 0,198x^4 + 0,1539x^5 \\ & + 0,12248x^6 + 0,02175x^7 \end{aligned} \quad \text{Equação 8}$$

Na Equação 7 e Equação 8 considerar o estabelecido na Equação 9.

$$x = \log \delta \quad \text{Equação 9}$$

Para a correção do ruído refletido, amplificação devido à reflexão (RF) da barreira oposta, tem-se a formulação da Equação 10.

$$\text{Correção}_{RF} = \{1,5 + (\Delta 2 - \Delta 3)[1 + \Delta 5(\Delta 1 - 1)]\}\Delta 4 \quad \text{Equação 10}$$

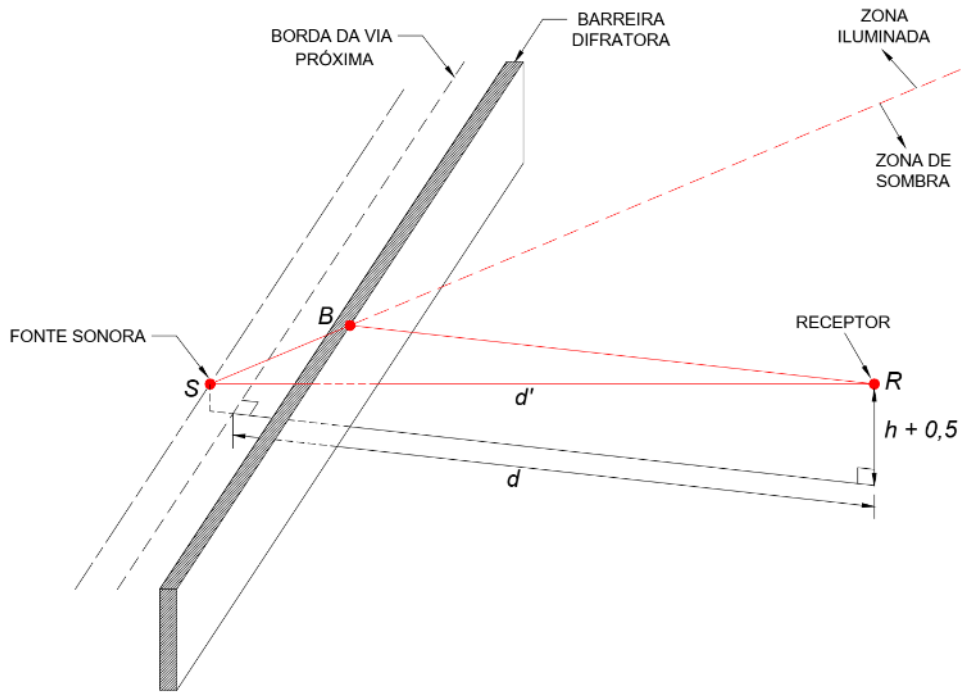


Figura 10: Diferença de percurso devido a uma obstrução.  
(Adaptado do HMSO (1988))

Onde  $\Delta l$  é determinado a partir da altura do ponto de recepção e da altura da barreira de reflexão (Figura 11):

se  $Y \geq W$  e  $\alpha \geq W$ , então  $\Delta l = W$

se  $Y \geq W$  e  $\alpha < W$ , então  $\Delta l = \alpha$  e caso  $\alpha < 1$ , então  $\Delta l = 1$

se  $Y < W$  e  $\alpha \geq Y$ , então  $\Delta l = Y$

se  $Y < W$  e  $\alpha < Y$ , então  $\Delta l = \alpha$  e caso  $\alpha < 1$ , então  $\Delta l = 1$

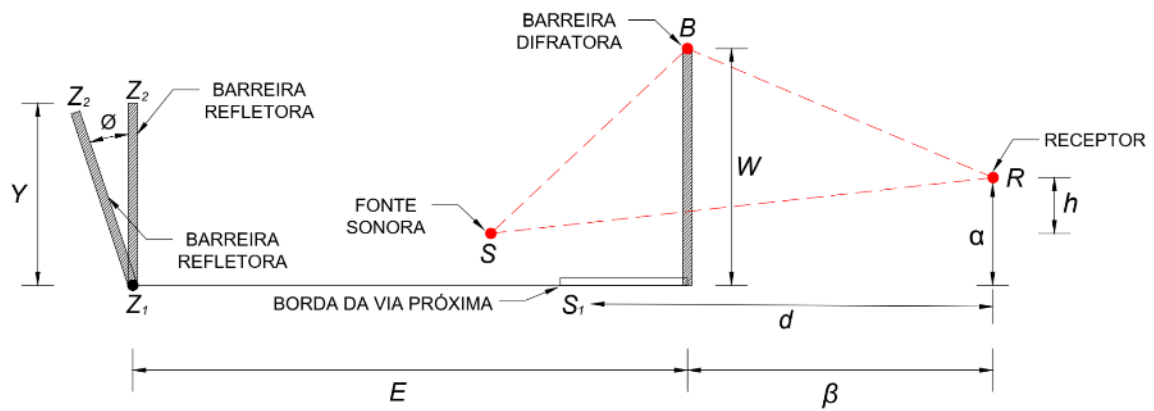


Figura 11: Geometria da barreira vertical,  $\phi = 0^\circ$ .  
(Adaptado do HMSO (1988))

A partir do desenho esquemático na Figura 11, observa-se a necessidade de detalhar o significado de alguns dos parâmetros apresentados. Define-se:

$Y$ : altura da barreira de reflexão do ruído;

$S$ : fonte do ruído;

$E$ : largura entre as barreiras;

$B$ : borda superior da barreira mais próxima do receptor;

$R$ : ponto de recepção;

$W$ : altura da barreira mais próxima do receptor;

$d$ : distância horizontal entre a borda da faixa de rodagem  $S_I$  mais próxima e o ponto de recepção;

$h$ : distância vertical entre a fonte de ruído e o ponto de recepção;

$\alpha$ : altura do ponto de recepção em relação ao pavimento da passagem inferior;

$\beta$ : distância horizontal entre o ponto de recepção e a borda superior da barreira;

$z1$ - $z2$ : barreira de reflexão do ruído.

Para determinar  $\Delta 2$  e  $\Delta 3$ , tem-se a Equação 11 e Equação 12.

$$\Delta 2 = [8,2 - 3 \log(\alpha + 10)] \cdot \log(\alpha + 10) - 5 \quad \text{Equação 11}$$

Em que:      se  $\alpha < 0$ , então  $\Delta 2 = 0,2$   
                  se  $\alpha > 30$ , então  $\Delta 2 = 0,44$

$$\Delta 3 = [1 - 0,6 \log\left(35 + \frac{\beta}{2}\right)] \cdot \log\left(35 + \frac{\beta}{2}\right) \quad \text{Equação 12}$$

Em que:      se  $\beta < 10$ , então  $\Delta 3 = +0,06$   
                  se  $\beta > 80$ , então  $\Delta 3 = -0,23$

O  $\Delta 4$  é determinado a partir da distância horizontal  $E$  entre as barreiras (Equação 13).

$$\Delta 4 = \log\left[1 + \left(\frac{270}{E}\right)\right] \quad \text{Equação 13}$$

Em que:      se  $E < 30$ , então  $\Delta 4 = 1$   
                  se  $E > 70$ , então  $\Delta 4 = 0,69$

Por fim,  $\Delta 5$  é determinado em função do ângulo  $\emptyset$ , o ângulo entre a barreira e uma reta normal ao plano do solo. Para o caso em estudo, a barreira não é inclinada, tem-se  $\emptyset = 0^\circ$ , resultando na Equação 14.

$$\Delta 5 = e^{(-0,019\emptyset^2)} \quad \text{Equação 14}$$

### 3.4 Estimativa do ruído e elaboração dos mapas acústicos com o SoundPLAN®

O processo de previsão do ruído e da elaboração dos mapas sonoros por meio de modelagens computacionais passou por duas etapas. A primeira consistiu em transformar os parâmetros geométricas (item 3.2.3) da área que foi estudada em um modelo digital. A segunda etapa se refere a importar o modelo da primeira etapa para o *software*, mesclá-lo com as informações coletadas dos parâmetros de tráfego (item 3.2.2) e gerar os mapas sonoros.

Para a elaboração de um mapa acústico existem diversos *softwares* disponíveis capazes de realizar este feito; dentre eles optou-se pelo uso do *software* SoundPLAN®.

Como forma de garantir uma representação mais precisa da área de estudo optou-se por utilizar a planta da região coletada no site da PMJP, que foi confrontada com os dados disponíveis no Google Earth®, conforme já elencado no item 3.2.3. O desenho foi exportado para o *software* SoundPLAN®. O modelo digital da área de estudo é apresentado na Figura 12.

Para que o *software* SoundPLAN® elabore os mapas sonoros é necessário que seja informada uma série de dados referentes à área objeto de estudo. Com o levantamento de dados realizados na área foi possível organizar uma base de dados para construção e calibração do modelo acústico da região.

Foi elaborada uma listagem contendo todas as informações necessárias para a realizar o mapa sonoro. Dividiu-se em três principais itens: geométricos (item 3.2.3), que se volta ao mapeamento físico/morfológico da área; tráfego (item 3.2.2), quantificação e caracterização do volume de tráfego; acústico (item 3.2.1), caracterização e quantificação dos níveis sonoros existentes.



Figura 12: Modelo digital da área de estudo.

Com a inserção dos dados e realização das previsões sonoras pelo *software*, fez-se a calibração da modelagem. O modelo digital foi calibrado com base na comparação dos dados obtidos em campo com os valores calculados pelo *software*. O modelo pode ser considerado calibrado quando a diferença entre estes valores foi menor que 3 dB(A) para no mínimo 90% dos resultados (Law *et al.*, 2011). O modelo inicialmente calibrado corresponde ao Cenário identificado por 0.

Após o modelo digital estar calibrado, outros 4 (quatro) cenários foram simulados e avaliados. Em seguida, foram gerados os mapas sonoros nos planos horizontal (*Grid Noise Map*) e vertical (*Cross Sectional Map*). A apresentação dos resultados é feita através de mapas de ruído, por meio de escalas cromáticas que distinguem os diversos níveis sonoros simulados para aquela região; e são apresentadas tabelas que mostram os valores obtidos na simulação.

Finalmente, ao todo foram simulados 5 (cinco) cenários, um da situação real e quatro situações hipotéticas. O Cenário 0 corresponde à situação real na qual foi considerada a BR-230 confinada em uma passagem inferior (barreiras acústicas paralelas) com 8,37m de altura

e topos em “L” de 1,10 m de largura e 0,20 m de espessura (vide Figura 5); o Cenário 1 corresponde à situação hipotética na qual foi considerada a BR-230 confinada em uma passagem inferior com 8,37m de altura e sem topo; o Cenário 2 corresponde a situação hipotética na qual foi considerada a BR-230 sem barreiras acústicas; o Cenário 3 corresponde a situação hipotética na qual foi considerada a BR-230 com barreiras acústicas sem topo, de alturas variando de 4, 6, 8, 10 e 12 m; e o Cenário 4 corresponde a situação hipotética na qual foi considerada a BR-230 com barreiras acústicas e com topos em “L” de 1,10 m de largura, de alturas variando de 4, 6, 8, 10 e 12 m.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Parâmetros acústicos

Por meio das medições de campo, foram coletados valores de nível de pressão sonora para os 14 pontos selecionados. Após, foi calculado o nível de pressão sonora equivalente (Equação 2). Os resultados obtidos estão na Tabela 1. Notar que em todos os dias medidos, foi sempre mensurado o nível de pressão sonora no ponto de controle P01. Para localização dos pontos, vide Figura 6.

Tabela 1: Nível de pressão sonora para os 14 pontos, em dB(A).

Dia 1					
Medições dB(A)	B&K (P01)	Minipa (P02)	Minipa (P03)	Minipa (P04)	
1° Medição (início às 08:45 h)	77,80	63,44	59,05	53,69	
2° Medição (início às 09:00 h)	77,80	61,98	58,47	52,85	
3° Medição (início às 09:15 h)	78,10	62,55	59,22	51,91	
4° Medição (início às 09:30 h)	77,70	62,51	58,30	52,19	
<b>LAeq (1h)</b>	<b>77,9</b>	<b>62,6</b>	<b>58,8</b>	<b>52,7</b>	
Dia 2					
Medições dB(A)	B&K (P01)	Minipa (P01A)	Minipa (P05)	Minipa (P06)	
1° Medição (início às 08:45 h)	78,20	65,24	49,10	50,27	
2° Medição (início às 09:00 h)	79,10	64,51	49,31	48,67	
3° Medição (início às 09:15 h)	78,00	65,51	48,62	50,07	
4° Medição (início às 09:30 h)	77,30	64,73	47,71	49,64	
<b>LAeq (1h)</b>	<b>78,2</b>	<b>65,0</b>	<b>48,7</b>	<b>49,7</b>	
Dia 3					
Medições dB(A)	B&K (P01)	Minipa (P13)	Minipa (P14)	Minipa (P07A)	
1° Medição (início às 08:40 h)	78,20	67,96	68,55	64,99	
2° Medição (início às 08:55 h)	78,30	68,25	68,60	65,48	
3° Medição (início às 09:10 h)	77,70	67,82	67,51	64,35	
4° Medição (início às 09:25 h)	78,40	68,07	68,24	64,98	
<b>LAeq (1h)</b>	<b>78,2</b>	<b>68,0</b>	<b>68,2</b>	<b>65,0</b>	
Dia 4					
Medições dB(A)	B&K (P01)	Minipa (P07)	Minipa (P08)	Minipa (P09)	Minipa (P10)
1° Medição (início às 08:20 h)	78,50	78,77	64,39	58,60	52,74
2° Medição (início às 08:35 h)	78,80	78,89	64,40	58,24	51,77
3° Medição (início às 08:50 h)	78,50	78,78	64,50	57,88	51,72
4° Medição (início às 09:05 h)	78,00	78,34	63,48	58,06	51,21
<b>LAeq (1h)</b>	<b>78,5</b>	<b>78,7</b>	<b>64,2</b>	<b>58,2</b>	<b>51,9</b>

A partir da Tabela 1, observa-se que na proporção que os pontos medidos se afastam da passagem inferior o ruído captado pelo sonômetro diminui. Constata-se, também, que os pontos equidistantes possuem níveis de pressão sonora semelhantes.

Foram quatro dias diferentes de coleta de dados. Portanto, para permitir uma avaliação conjunta e simultaneamente do efeito da barreira em todos os pontos, os resultados foram

homogeneizados. Para isso tomou-se como referência o ponto P01 e dele foram coletados dados em todas as medições.

A homogeneização foi feita como segue: calculou-se a diferença dos valores obtidos para o ponto P01 no primeiro dia de medição em relação aos valores obtidos para este mesmo ponto em cada um dos demais dias; essa diferença foi somada (ou subtraída, conforme aplicável) ao valor de cada um dos outros pontos, o resultado homogeneizado pode ser observado na Tabela 2.. Este procedimento leva todos as medições para o tráfego do primeiro dia. Ele poderia ter sido feito tomando qualquer dia como referência.

Tabela 2: Valores homogeneizados (em dB(A))

Valores medidos homogeneizados	
P01 – 0 m	77,9
P07 – 0 m	78,1
P13 – 7 m	67,7
P14 – 7 m	67,9
P01A – 10 m	64,7
P07A – 10 m	64,7
P02 – 14 m	62,6
P08 – 14 m	63,6
P03 – 28 m	58,8
P09 – 28 m	57,6
P10 – 60 m	51,3
P04 – 60,7 m	52,7
P05 – 112 m	48,5
P06 – 227,9 m	49,4

## 4.2 Parâmetros de tráfego

Concomitantemente à medição de ruído, foram obtidos dados de tráfego como composição, velocidade e fluxo de veículos, utilizando a metodologia apresentada no item 3.2.2. Os dados foram catalogados por faixa de tráfego, por tipo de veículo e por dia de coleta. Foram calculadas as porcentagens de cada tipo de veículo em relação ao total e a velocidade média de cada faixa de tráfego. Os dados detalhados estão apresentados na Tabela 3.



Tabela 3: Caracterização detalhada do tráfego.

Categoria	Dia 1											
	Faixa 1			Faixa 2			Faixa 3			Faixa 4		
	qnt.	%	v. (km/h)	qnt	%	v. (km/h)	qnt	%	v. (km/h)	qnt	%	v. (km/h)
Automóvel	609	57,5%	69,33	1219	82,2%	67,3	1280	89,4%	80,64	806	73,4%	69,99
Motocicleta	327	30,8%	72,10	203	13,7%	78,28	86	6,0%	80,64	183	16,7%	69,79
Veículo pesado	124	11,7%	56,11	61	4,1%	51,12	66	4,6%	73,26	109	9,9%	66,29
Total	1060	100,0%	-	1483	100,0%	-	1432	100,0%	-	1098	100,0%	-
Média (km/h)	-		68,64	-		68,14	-		80,30	-		69,59
Categoria	Dia 2											
	Faixa 1			Faixa 2			Faixa 3			Faixa 4		
	qnt	%	v. (km/h)	qnt	%	v. (km/h)	qnt	%	v. (km/h)	qnt	%	v. (km/h)
Automóvel	591	58,6%	65,25	1138	83,1%	72,50	1299	90,6	76,25	795	74,2%	69,89
Motocicleta	329	32,6%	70,49	186	13,6%	75,56	99	6,9	81,51	179	16,7%	68,45
Veículo pesado	89	8,8%	51,31	45	3,3%	65,59	36	2,5	80,62	98	9,1%	63,70
Total	1009	100,0%	-	1369	100,0%	-	1434	100,0%	-	1072	100,0%	-
Média (km/h)	-		65,73	-		72,69	-		76,72	-		69,08
Categoria	Dia 3											
	Faixa 1			Faixa 2			Faixa 3			Faixa 4		
	qnt	%	v. (km/h)	qnt	%	v. (km/h)	qnt	%	v. (km/h)	qnt	%	v. (km/h)
Automóvel	548	57,4%	65,79	1185	83,6%	75,39	1330	89,9%	84,50	822	72,9%	71,93
Motocicleta	309	32,4%	68,71	180	12,7%	78,33	98	6,6%	80,02	199	17,7%	72,82
Veículo Pesado	98	10,3%	61,80	53	3,7%	67,17	51	3,4%	79,21	106	9,4%	65,92
Total	955	100,0%	-	1418	100,0%	-	1479	100,0%	-	1127	100,0%	-
Média (km/h)	-		66,33	-		75,46	-		84,02	-		71,52
Categoria	Dia 4											
	Faixa 1			Faixa 2			Faixa 3			Faixa 4		
	qnt	%	v. (km/h)	qnt	%	v. (km/h)	qnt	%	v. (km/h)	qnt	%	v. (km/h)
Automóvel	570	54,7%	67,21	1197	82,8%	77,28	1484	91,8%	78,75	841	74,3%	69,27
Motocicleta	375	36,0%	71,55	212	14,7%	72,57	100	6,2%	81,04	188	16,6%	70,55
Veículo pesado	98	9,4%	45,01	36	2,5%	70,60	32	2,0%	81,18	103	9,1%	66,61
Total	1043	100,0%	-	1445	100,0%	-	1616	100,0%	-	1132	100,0%	-
Média (km/h)	-		66,68	-		76,42	-		78,94	-		69,24

Compilando de maneira resumida, foram reunidos os dados de tráfego de forma a ficarem apenas indicados nas seguintes variáveis: velocidade ( $v$ ) e fluxo de veículos ( $q$ ) e o percentual de veículos pesados em relação ao fluxo total ( $p$ ); os dados estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4: Caracterização do tráfego resumida.

Dia 1			Dia 2		
Variáveis	Faixa 1 e 2	Faixa 3 e 4	Variáveis	Faixa 1 e 2	Faixa 3 e 4
$q$	2543	2530	$q$	2378	2506
$v$ (km/h)	68,35	75,65	$v$ (km/h)	69,74	73,46
$p$ (%)	7,27%	6,92%	$p$ (%)	5,63%	5,35%
Dia 3			Dia 4		
Variáveis	Faixa 1 e 2	Faixa 3 e 4	Variáveis	Faixa 1 e 2	Faixa 3 e 4
$q$	2373	2606	$q$	2488	2748
$v$ (km/h)	71,78	78,62	$v$ (km/h)	72,34	74,94
$p$ (%)	6,36%	6,02	$p$ (%)	5,39%	4,91%

O modelo do CoRTN utiliza os dados de tráfego de forma resumida em seus cálculos, conforme apresentado na Tabela 4. Por outro lado, para a modelagem computacional, foi necessário implementar os dados de maneira mais detalhada, conforme apresentado na Tabela 3.

#### 4.3 Cálculo das estimativas do nível de pressão sonora a partir do modelo do CoRTN

A partir dos dados de tráfego apresentados no item 4.2, estimou-se o nível de pressão sonora equivalente seguindo as etapas de cálculo elencadas no item 3.3.

Primeiro, foi realizado o cálculo da estimativa de ruído desconsiderando o efeito da passagem inferior e, em seguida, considerando a difração da barreira mais próxima e a reflexão da barreira mais afastada.

Desconsiderando o efeito da passagem inferior, foi utilizada a Equação 4. Nela se calcula a estimativa do nível de pressão sonora de tráfego, para todos os pontos. Foi calculado o  $L_{10}$  para uma distância de referência de 13,5 m do ponto de recepção até a fonte sonora (Tabela 5).

Tabela 5: Cálculo do  $L_{10}$ , considerando a distância entre a fonte e o receptor de 13,5 metros

Variáveis	Faixa 1 e 2	Faixa 3 e 4
Dia 1 - $L_{10}(1h)$ dB(A)	77,39	77,95
Dia 2 - $L_{10}(1h)$ dB(A)	76,87	77,38
Dia 3 - $L_{10}(1h)$ dB(A)	77,21	78,16
Dia 4 - $L_{10}(1h)$ dB(A)	77,26	77,83

Fez-se, então, uma correção no ruído que será adicionada ao resultado obtido pela Equação 4. A correção foi feita para a real distância entre a fonte de ruído e o ponto de

recepção, utilizando a Equação 5. Nesta Equação 5 a altura da fonte sonora considerada foi de 0,50 m e a altura do ponto de recepção igual a 1,30 m, altura dos sonômetros em relação ao solo (conforme definido no item 3.2.1).

De posse do  $L_{10}$ , resultado sem barreira acústica, para cada ponto procede-se para a conversão de  $L_{10}$  para  $LA_{eq}$ . Essa conversão foi feita com base nas medições realizadas em campo na qual calculou-se o  $L_{10}$  e o  $LA_{eq}$  para cada ponto e realizou-se uma relação entre eles. A relação de conversão  $LA_{eq}/L_{10}$  pode ser observada na Tabela 6.

Tabela 6: Relação entre  $LA_{eq}$  e  $L_{10}$  para cada ponto medido por dia

$LA_{eq}/L_{10}$			
Dia 1		Dia 3	
P01	0,9753	P01	0,9775
P02	0,9553	P13	0,9727
P03	0,9510	P14	0,9614
P04	0,9291	P07A	0,9659
Dia 2		Dia 4	
P01	0,9745	P01	0,9785
P01A	0,9647	P07	0,9670
P05	0,9365	P08	0,9670
P06	0,9412	P09	0,9537
		P10	0,9692

Nas Tabelas 23 a 26 (Apêndice A), pode-se observar as variáveis de cálculo e o resultado do  $LA_{eq}$  para cada um dos 14 pontos, simulando uma situação onde não existe a passagem inferior.

Em seguida, calculou-se a previsão do ruído com barreira acústica, simulando a passagem inferior.

Inicialmente foi feito o cálculo do  $L_{10}$  (Equação 5), pois a variável  $h$  foi alterada para considerar a passagem inferior. A altura da fonte sonora em relação ao solo continuou igual a 0,50 m, porém a altura do ponto de recepção foi alterada para 9,67m (8,37m da passagem inferior somada a 1,30m que o ponto de recepção já possuía). Logo, somou-se ao  $h$  existente o valor de 8,37 m referente à altura da barreira acústica.

A partir da Equação 6, calculou-se a diferença de percurso devido uma obstrução  $\delta$ . É necessário realizar uma correção nos valores de acordo com a localização do ponto de recepção, logo, deve-se observar se o ponto de recepção está em uma zona iluminada (que é

o caso do P01 e P07) ou em uma zona de sombra (todos os demais), utilizando a Equação 7, Equação 8 e Equação 9.

Após este procedimento, tem-se a parcela de redução do ruído devido a difração da primeira barreira. Nas Tabelas 27 a 30 (Apêndice A), pode-se observar as variáveis de cálculo e o resultado do  $LA_{eq}$  para cada ponto, apenas considerando a difração da primeira barreira.

Por fim, foi realizada a correção devido a reflexão da segunda barreira; calcula-se o  $\Delta 1$ ,  $\Delta 2$ ,  $\Delta 3$ ,  $\Delta 4$  e  $\Delta 5$  e em seguida faz a correção devido a reflexão a partir da Equação 10; soma-se a parcela da correção devido a difração da primeira barreira, à parcela da correção devido a reflexão da segunda barreira; e obtém-se a previsão do ruído com barreira acústica.

De posse do  $L_{10}$ , o resultado com barreira acústica, para cada ponto procede-se para a conversão de  $L_{10}$  para  $LA_{eq}$ . Nas Tabelas 31 a 34 (Apêndice A), pode-se observar as variáveis de cálculo e o resultado do  $LA_{eq}$  para cada ponto considerando a difração da barreira mais próxima e a reflexão da barreira oposta.

A homogeneização em relação ao P01 também foi realizada, conforme anteriormente descrita no item 4.1. Para facilitar a comparação, todos os resultados obtidos foram agrupados. Os valores para difração e reflexão podem ser visualizados na Tabela 7. Observa-se que a medida que o ponto de recepção se distancia da fonte sonora, tanto a difração da barreira próxima quanto a reflexão da barreira afastada aumentam. Salienta-se que para os pontos situados sobre a barreira (zona iluminada) a difração da barreira próxima é, aproximadamente, nula.

Na Tabela 8, bem como na Figura 13, são apresentados os resultados de forma sequenciada dos valores obtidos para o nível de pressão sonora prevista sem a passagem inferior, prevista com a passagem inferior e real com passagem inferior. Calculou-se o erro, ou seja, a variação entre o valor previsto e real com a passagem inferior. Por fim, foi calculado o valor da possível atenuação -  $IL$  (Equação 1), isto é, a diferença entre o nível de pressão sonora sem a passagem inferior e o mesmo com a passagem inferior.

Tabela 7: Correções em dB(A) para difração e reflexão.

Ponto - Distância	Difração	Reflexão	Resultante
P01 – 0 m	+0,2	-5,9	- 5,7
P07 – 0 m	+0,2	-5,9	- 5,7
P13 – 7 m	+12,3	-6,2	+ 6,1
P14 – 7 m	+12,3	-6,2	+ 6,1
P01A – 10 m	+13,6	-6,3	+ 7,3
P07A – 10 m	+13,5	-6,3	+ 7,3
P02 – 14 m	+14,5	-6,4	+ 8,1
P08 – 14 m	+14,7	-6,5	+ 8,2
P03 – 28 m	+16,0	-7,0	+ 9,0
P09 – 28 m	+16,0	-7,0	+ 9,0
P10 – 60 m	+17,3	-8,3	+ 9,0
P04 – 60.7 m	+16,6	-8,0	+ 8,6
P05 – 112 m	+17,2	-9,7	+ 7,5
P06 – 227.9 m	+17,6	-12,5	+ 5,1

Tabela 8: Comparação de todos os LAeq em dB(A) previstos e reais.

Ponto - Distância	(1)	(2)	(3)	(2) - (3)	(1) - (3)
	Previsto sem passagem inferior	Previsto com passagem inferior	Real com passagem inferior	Erro	<i>IL</i> (Equação 1)
P01 – 0 m	77,1	82,8	77,9	+ 4,9	- 0,8
P07 – 0 m	76,2	81,9	78,1	+ 3,8	- 1,9
P13 – 7 m	74,3	68,2	67,7	+ 0,5	+ 6,6
P14 – 7 m	73,5	67,4	67,9	- 0,5	+ 5,6
P01A – 10 m	73,2	65,9	64,7	+ 1,2	+ 8,5
P07A – 10 m	73,1	65,8	64,7	+ 1,1	+ 8,4
P02 – 14 m	71,7	63,6	62,6	+ 1,0	+ 9,1
P08 – 14 m	72,3	64,1	63,6	+ 0,5	+ 8,7
P03 – 28 m	69,5	60,5	58,8	+ 1,7	+ 10,7
P09 – 28 m	69,4	60,4	57,6	+ 2,8	+ 11,8
P10 – 60 m	68,0	59,0	51,3	+ 7,7	+ 16,7
P04 – 60.7 m	65,4	56,8	52,7	+ 4,1	+ 12,7
P05 – 112 m	63,8	56,3	48,5	+ 7,9	+ 15,3
P06 – 227.9 m	61,4	56,3	49,4	+ 6,9	+ 12,0

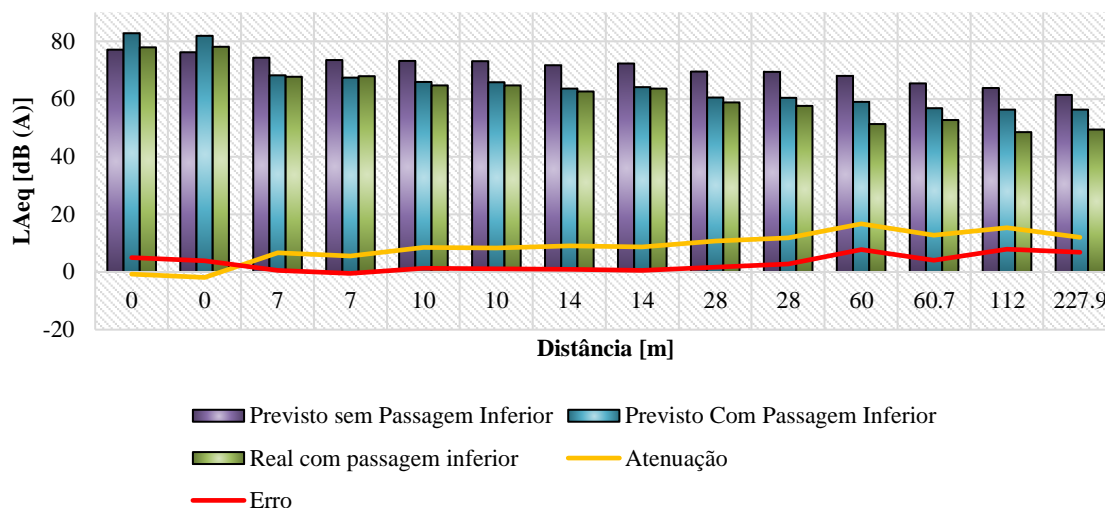


Figura 13: Gráfico comparando todos os LAeq em dB(A) previstos, reais, atenuação e o erro.

Comparando as estimativas feitas com o modelo CoRTN e os valores medidos em campo considerando a passagem inferior, constata-se que o modelo superestima o ruído. O valor é superestimado, principalmente, para pontos próximos da borda da passagem inferior e para os pontos mais afastados.

Os pontos intermediários (entre a borda e 28 m) apresentaram menores erros, entre 0,5 dB(A) e 2,8 dB(A); já os pontos situados nas bordas apresentaram erros de em média 4,4 dB(A); e os pontos muito distantes (a partir de 60,7 m da borda) tiveram variações na ordem de 4,1 dB(A) a 7,9 dB(A).

Uma explicação para essas maiores variações em pontos mais afastados é que o modelo do CoRTN não leva em consideração a forma urbana ao redor dos pontos de recepção. Ou seja, o modelo matemático não leva em consideração as edificações no entorno e considera que todos os pontos de recepção estão em um mesmo nível, sem levar em conta a topografia do terreno.

Outra justificativa, que se aplica aos pontos próximos à barreira, vem do fato da existência de uma saliência no topo da barreira (topo em forma de “L”) que não é considerada no modelo do CoRTN; esta saliência pode contribuir para reduzir a parcela do ruído que reflete na barreira minimizando as diferenças entre os níveis de ruído medidos e previstos. A forma do topo da barreira pode contribuir para a atenuação do ruído, podendo ser ainda

maior como no caso em estudo. A atenuação do nível de pressão sonora pode variar de 2 dB para 0,5 m até 4 dB para 2,5 m de extensão do topo da barreira (Crombie *et al.*, 1995; Ishizuka e Fujiwara, 2004; Bistafa, 2011).

A partir dos valores obtidos na Tabela 7, observa-se que a difração da barreira mais próxima teve um efeito mais preponderante no nível de pressão sonora. Verificou-se, também, que a parcela de reflexão da barreira oposta varia em menor proporção que a de difração e os pontos em zona iluminada são os mais afetados pela reflexão. Nos pontos situados na zona iluminada a difração da barreira próxima é muito baixa, praticamente zero. Em suma, quanto mais distante for o ponto de recepção da borda da passagem inferior, maior será o efeito benéfico da mesma.

Quando comparadas as estimativas de ruído sem a passagem inferior com os níveis de ruído medidos com a passagem inferior, pode-se obter uma atenuação média (conforme a Equação 1 e Equação 2), apenas nos pontos em sombra acústica, de 11,8 dB(A).

#### **4.4 Cálculo da estimativa do ruído e elaboração dos mapas acústicos utilizando o SoundPLAN®**

Para a realização da estimativa do ruído e elaboração dos mapas acústicos foi utilizada a metodologia apresentada no item 3.4. Os resultados obtidos nas simulações computacionais foram organizados de acordo com o tipo de cenário. O critério estabelecido para a análise desses cenários baseia-se nos aspectos relacionados à calibração do modelo, à exposição dos mapas sonoros (horizontais e verticais) e à análise comparativa entre eles.

Primeiramente, Cenário 0 corresponde à situação real na qual foi considerada a BR-230 confinada em uma passagem inferior (barreiras acústicas paralelas) com 8,37m de altura e topos em “L” de 1,10 m de largura e 0,20 m de espessura. Foram implementados no programa os dados de tráfego coletados conforme a Tabela 3 e Tabela 4.

Procedeu-se com a verificação da calibração do sistema e na Tabela 9 são apresentados os valores reais e os valores modelados para cada dia de coleta. Buscou-se comparar os resultados medidos em campo com os previstos pela modelagem no SoundPLAN e verificar a precisão na calibração da modelagem.

Para atingir esta calibração os veículos tipo motocicletas foram considerados, acusticamente, como veículos pesados. Caso contrário a modelagem retornava valores de ruído muito abaixo dos valores acústicos coletados em campo.

Tabela 9: Comparação do Cenário 0 em dB(A) para cada dia de medição, o erro está em valor absoluto.

<b>Dia 1</b>			
Pontos	Valores reais	Valores modelados	Erro
P01	77,9	71,1	6,8
P02	62,6	61,5	1,1
P03	58,8	58,9	0,1
P04	52,7	56,0	3,3
<b>Dia 2</b>			
Pontos	Valores reais	Valores modelados	Erro
P01	78,1	71,0	7,1
P01A	65,0	62,7	2,3
P05	48,7	53,3	4,6
P06	49,7	44,9	4,8
<b>Dia 3</b>			
Pontos	Valores reais	Valores modelados	Erro
P01	78,2	71,4	6,8
P13	68,0	66,3	1,7
P14	68,2	65,6	2,6
P07A	65,0	62,2	2,8
<b>Dia 4</b>			
Pontos	Valores reais	Valores modelados	Erro
P01	78,4	71,1	7,3
P07	78,7	70,9	7,8
P08	64,2	59,7	4,5
P09	58,2	56,4	1,8
P10	51,9	54,8	2,9

Law *et al.* (2011) sugere que uma variação de  $\pm 3$ dB (A) entre o valor real e modelado para 90% dos resultados é um ótimo parâmetro de aceitação pois demonstra resultados melhores que diversos outros estudos analisados.

Contudo, os valores obtidos na calibração do Cenário 0 contou com uma variação de até  $\pm 3$ dB (A) em 47,1% dos resultados. Ou seja, apenas 8 dos 17 valores modelados estão dentro do considerado aceitável. Os pontos que foram melhor calibrados são aqueles que estão a uma distância intermediária, entre 7 m a 60 m da barreira. Frisa-se que a maior parte dos resultados (9 dos 17 valores, 52,9%) ficaram abaixo dos 4 dB (A) de variação.



Para comparações futuras com os demais cenários, realizou-se a modelagem do Cenário 0 com as médias obtidas dos dados de tráfego. Obteve-se o valor modelado homogeneizado para todos os pontos para este Cenário 0 (Tabela 10).

Para modelagem realizada no Cenário 0 foram elaborados mapas de ruído no plano horizontal (*Grid Noise Map*) e vertical (*Cross Sectional Map*) (Figura 22 a Figura 26, Apêndice B). A resolução da grade (*grid*) usada nos mapas horizontais foi de 5x5 metros e nos mapas verticais (cortes) também foi de 5x5 metros, com altura de corte variando entre 20 e 25 metros.

Tabela 10: Valores homogeneizados em dB(A) para o Cenário 0.

<b>Cenário 0 - Homogeneizado</b>	
Pontos	Valores modelados
P01 – 0 m	71,2
P07 – 0 m	70,7
P13 – 7 m	66,1
P14 – 7 m	65,5
P01A – 10 m	62,9
P07A – 10 m	62,1
P02 – 14 m	61,6
P08 – 14 m	59,5
P03 – 28 m	58,9
P09 – 28 m	56,2
P10 – 60 m	54,6
P04 – 60,7 m	56,0
P05 – 112 m	53,5
P06 – 227,9 m	45,1

Em seguida, como a condição para a calibração proposta por Law et al. (2011) não foi plenamente satisfeita para o Cenário 0, repetiu-se a calibração do sistema para o Cenário 1. Este cenário corresponde a BR-230 confinada em uma passagem inferior com 8,37m de altura e sem topos em “L”. Esta nova calibração objetiva verificar se a existência ou não da borda impede que a calibração seja possível. Foram implementados no *software* os dados de tráfego coletados conforme a Tabela 3 e Tabela 4.

Na Tabela 11 são apresentados os valores reais e os valores modelados para cada dia de coleta, de forma a verificar se o sistema implementado no software foi calibrado. Buscou-se comparar os resultados medidos em campo com os previstos pela modelagem no SoundPLAN®.

Tabela 11: Valores calibrados em dB(A) para cada dia de medição, o erro está em valor absoluto.

<b>Dia 1</b>			
Pontos	Valores reais	Valores modelados	Erro
P01	77,9	77,8	0,1
P02	62,6	61,4	1,2
P03	58,8	57,2	1,6
P04	52,7	51,2	1,5
<b>Dia 2</b>			
Pontos	Valores reais	Valores modelados	Erro
P01	78,1	77,7	0,4
P01A	65,0	63,3	1,7
P05	48,7	46,5	2,2
P06	49,7	48,9	0,8
<b>Dia 3</b>			
Pontos	Valores reais	Valores modelados	Erro
P01	78,2	78,1	0,1
P13	68,0	68,9	0,9
P14	68,2	68,1	0,1
P07A	65,0	63,0	2,0
<b>Dia 4</b>			
Pontos	Valores reais	Valores modelados	Erro
P01	78,4	78,1	0,3
P07	78,7	77,8	0,9
P08	64,2	60,1	4,1
P09	58,2	55,6	2,6
P10	51,9	49,9	2,0

Os valores obtidos na calibração do Cenário 1 contaram com uma variação de até  $\pm 3$ dB (A) em 94,1% dos resultados. Ou seja, 16 dos 17 valores modelados estão dentro do aceitável. Frisa-se, ainda, que a maior parte dos resultados (12 dos 17 valores, 70,6%) ficou abaixo dos 2 dB (A) de variação.

Logo, embora a situação modelada no Cenário 1 não seja totalmente fiel à situação real, já que não foram considerados os topos em “L” da passagem inferior (barreira acústica), a calibração mostrou-se mais adaptada aos valores coletados em campo se comparado a calibração obtida com o Cenário 0 que considera os topos em “L”.

Mais uma vez, os veículos tipo motocicletas foram considerados como veículos pesados e assim foi possível atingir esta calibração com mais de 90% dos resultados dentro dos limites de confiabilidade.

Para fins de comparação futura com os demais cenários, realizou-se a modelagem do Cenário 1 com as médias obtidas dos dados de tráfego, obtendo-se o valor modelado homogeneizado para todos os pontos deste Cenário 1 (Tabela 12).

Tabela 12: Valores homogeneizado em dB(A) para o Cenário 1.

<b>Cenário 1 - Homogeneizado</b>	
Pontos	Valores modelados
P01 – 0 m	77,9
P07 – 0 m	77,6
P13 – 7 m	68,7
P14 – 7 m	67,9
P01A – 10 m	63,5
P07A – 10 m	62,8
P02 – 14 m	61,5
P08 – 14 m	58,9
P03 – 28 m	57,3
P09 – 28 m	53,4
P10 – 60 m	47,8
P04 – 60,7 m	51,2
P05 – 112 m	46,7
P06 – 227,9 m	39,0

Para modelagem realizada no Cenário 1 foram elaborados mapas de ruído no plano horizontal e vertical (Figura 27 a Figura 31, Apêndice B). A resolução da grade usada nos mapas horizontais foi de 5x5 metros e nos mapas verticais também foi de 5x5 metros, com altura de corte variando entre 20 e 25 metros.

Em uma primeira análise, compara-se a atenuação sonora da barreira acústica sem borda e com borda (Cenário 1 e 0, respectivamente). Utilizou-se a Equação 1 para calcular o  $IL$ , na Tabela 13 e na Figura 14 observa-se a comparação dos  $L_{Aeq}$  em dB(A) de barreiras acústicas paralelas com e sem borda.

O uso da borda na barreira acústica mostra-se vantajosa até determinada distância, a partir de 14 m o desempenho da borda se mostra ineficiente já que foram encontrados valores negativos para a perda por inserção. Até 10 m de distância o valor médio para a atenuação sonora, do cenário com borda em relação ao cenário sem borda, é de 4,1 dB(A). Já para todos os pontos de interesse, o valor médio para a atenuação sonora é de 1,4 dB(A).

Percebe-se que houve uma mudança na distribuição sonora, quando são comparados os Cenários 0 e 1. Nos mapas acústicos é possível verificar que a propagação das ondas sonoras para o Cenário 0 (Figura 22 a Figura 26) é diferente do comportamento das ondas sonoras no Cenário 1 (Figura 27 a Figura 31, Apêndice B).

Logo, a combinação “barreiras acústicas paralelas” e “borda no topo da barreira acústica” se mostrou ser uma configuração geometria eficiente apenas para os pontos próximos a passagem inferior. Para os pontos mais afastados, a inserção da borda ocasionou uma amplificação no ruído propagado.

Tabela 13: Comparação dos LAeq em dB(A) com e sem borda e cálculo da atenuação.

Ponto - Distância	(1)	(2)	(1) - (2)
	Sem borda	Com borda	IL
P01 – 0 m	77,9	71,2	+6,7
P07 – 0 m	77,6	70,7	+6,9
P13 – 7 m	68,7	66,1	+2,6
P14 – 7 m	67,9	65,5	+2,4
P01A – 10 m	63,5	62,9	+0,6
P07A – 10 m	62,8	62,1	+0,7
P02 – 14 m	61,5	61,6	-0,1
P08 – 14 m	58,9	59,5	-0,6
P03 – 28 m	57,3	58,9	-1,6
P09 – 28 m	53,4	56,2	-2,8
P10 – 60 m	47,8	54,6	-6,8
P04 – 60,7 m	51,2	56,0	-4,8
P05 – 112 m	46,7	53,5	-6,8
P06 – 227,9 m	39,0	45,1	-6,1

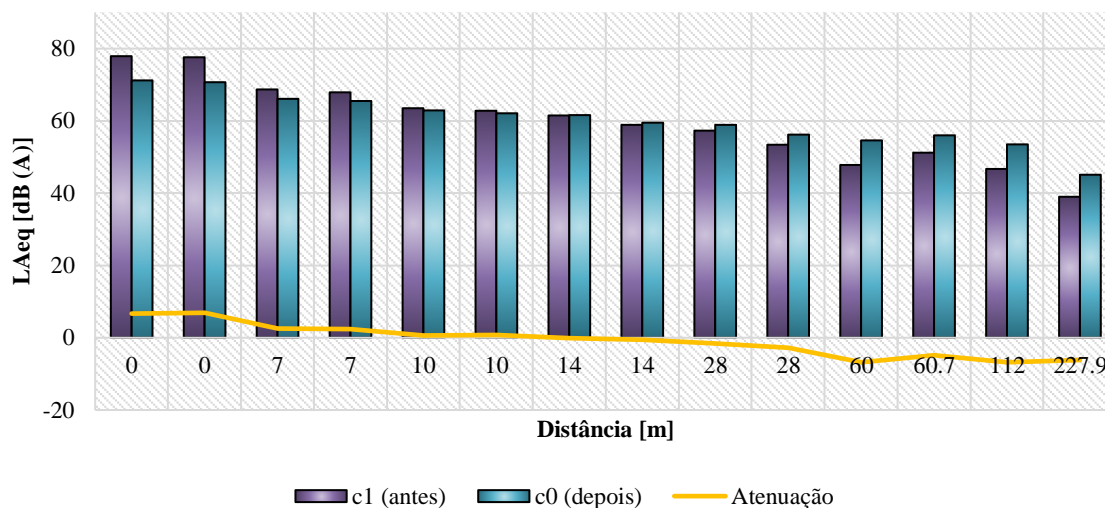


Figura 14: Gráfico comparando os LAeq em dB(A) com e sem borda e a atenuação sonora.

No Cenário 2 trata-se da situação hipotética na qual foi considerada a BR-230 sem barreiras acústicas. Neste cenário foi avaliado o nível do ruído na região quando não são implementadas as passagens inferiores. Na Tabela 14 e nas Figuras 32 a 36 (Apêndice B) podem ser visualizados os valores de ruído modelados com as características do Cenário 2. Assim como ocorreu para os cenários anteriores foi feita uma modelagem com as médias dos dados de tráfego, obtendo-se os valores de ruído homogeneizados.

Foram elaborados mapas de ruído no plano horizontal e vertical. A grade usada nos mapas horizontais e mapas verticais foi de 5x5 metros, com altura de corte variando entre 20 e 25 metros.

Tabela 14: Valores em dB(A) para o Cenário 2.

Pontos	Cenário 02				
	Valores modelados				
	Dia 01	Dia 02	Dia 03	Dia 04	Homogeneizado
P01 – 0 m	80,9	80,7	80,8	81,1	80,9
P07 – 0 m	80,8	80,5	80,7	81,0	80,7
P13 – 7 m	79,5	79,2	79,4	79,7	79,4
P14 – 7 m	79,3	79,0	79,3	79,5	79,2
P01A – 10 m	76,7	76,5	76,7	77,0	76,7
P07A – 10 m	76,5	76,2	76,5	76,7	76,4
P02 – 14 m	75,3	75,1	75,4	75,5	75,3
P08 – 14 m	73,8	73,5	73,8	74,0	73,7
P03 – 28 m	71,4	71,2	71,5	71,6	71,4
P09 – 28 m	67,4	67,2	67,5	67,7	67,4
P10 – 60 m	60,4	60,2	60,5	60,6	60,4
P04 – 60,7 m	60,6	60,4	60,8	60,9	60,6
P05 – 112 m	51,3	51,1	51,4	51,5	51,3
P06 – 227,9 m	43,4	43,2	43,6	43,7	43,4

Investigando os dados modelados com e sem a passagem inferior (Cenário 0, 1 e 2), já é possível calcular a atenuação sonora (conforme Equação 1), para os valores homogeneizados. Na Tabela 15, na Figura 15 e Figura 16 esses resultados são apresentados.

Tabela 15: Comparação dos LAeq em dB(A) com e sem passagem inferior, modelados no software, e cálculo da atenuação.

Ponto - Distância	(1)	(2)	(3)	(1) - (2)	(1) - (3)
	Cenário 2	Cenário 0	Cenário 1	$IL_1$	$IL_2$
P01 – 0 m	80,9	71,2	77,9	+9,7	+3,0
P07 – 0 m	80,7	70,7	77,6	+10,0	+3,1
P13 – 7 m	79,4	66,1	68,7	+13,3	+10,7
P14 – 7 m	79,2	65,5	67,9	+13,7	+11,3
P01A – 10 m	76,7	62,9	63,5	+13,8	+13,2
P07A – 10 m	76,4	62,1	62,8	+14,3	+13,6
P02 – 14 m	75,3	61,6	61,5	+13,7	+13,8
P08 – 14 m	73,7	59,5	58,9	+14,2	+14,8
P03 – 28 m	71,4	58,9	57,3	+12,5	+14,1
P09 – 28 m	67,4	56,2	53,4	+11,2	+14,0
P10 – 60 m	60,4	54,6	47,8	+5,8	+12,6
P04 – 60,7 m	60,6	56,0	51,2	+4,6	+9,4
P05 – 112 m	51,3	53,5	46,7	-2,2	+4,6
P06 – 227,9 m	43,4	45,1	39,0	-1,7	+4,4
Média (pontos na sombra acústica)				<b>11,9</b>	<b>12,4</b>

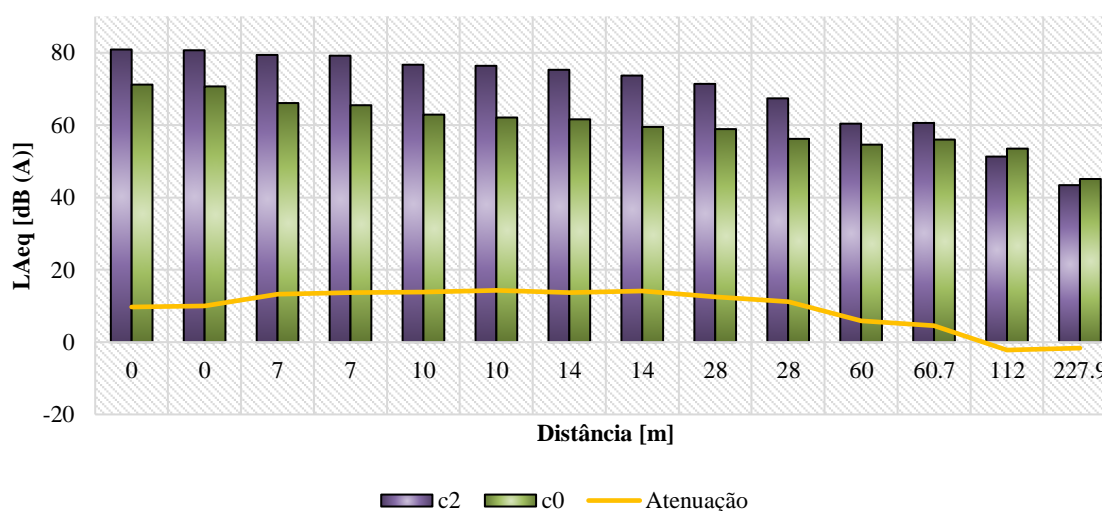


Figura 15: Gráfico comparando os LAeq em dB(A) do Cenário 2 e Cenário 0.

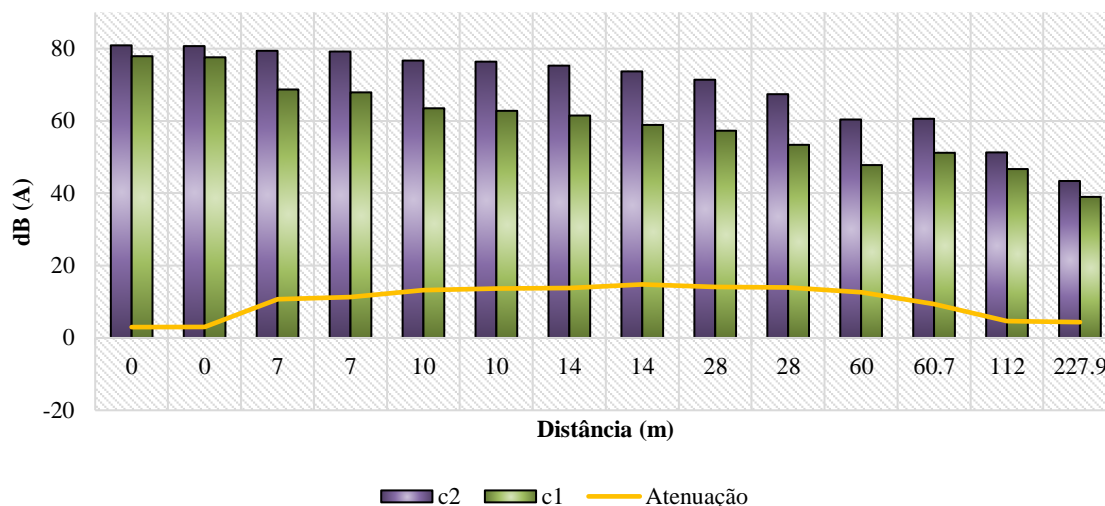


Figura 16: Gráfico comparando os LAeq em dB(A) do Cenário 2 e Cenário 1.

Diferente da análise obtida no item 4.3, embora os pontos P01 e P07 estejam na zona iluminada da barreira acústica a parcela de reflexão não está superando a difração, ocasionando uma atenuação sonora mesmo para os pontos fora da zona de sombra acústica.

Observa-se que a função que representa a atenuação, diferente do obtido no item 4.3, apresenta o comportamento mais próximo ao de uma parábola e não mais de uma função linear crescente. Ou seja, a medida que o ponto de recepção se distancia de barreira acústica a atenuação sonora aumenta até um certo limite. Em uma determinada distância, chega-se ao pico de atenuação e a partir deste ponto ela começa a decrescer. Isso pode significar que a barreira acústica não está mais interferindo na atenuação do ruído, para grandes distâncias.

A partir dos resultados obtidos, o valor médio de atenuação para os pontos situados na zona de sombra (calculada utilizando a Equação 2) foi de  $IL_1 = 11,9$  dB(A) e  $IL_2 = 12,4$  dB(A). Observa-se que este valor é numericamente equivalente ao valor da atenuação obtida utilizando as fórmulas do CoRTN, no item 4.3, que foi 11,8 dB(A). As fórmulas do CoRTN, embora simplificadas, se mostraram confiáveis e possuem resultados representativos para pequenas áreas se comparados a uma modelagem computacional.

O Cenário 3 corresponde a situação hipotética na qual foi considerada a BR-230 com barreiras acústicas sem borda, de alturas variando de 4, 6, 8, 10 e 12 m. Nele a simulação foi realizada apenas com as médias dos dados dos quatro dias de coletas de tráfego. Ou seja, o

mesmo método utilizado para calcular os valores homogeneizados do ruído para os Cenários 0, 1 e 2. Na Tabela 16, bem como nas Figuras 37 a 41 (Apêndice B), podem ser observados os resultados desta modelagem.

Tabela 16: Valores em dB(A) para o Cenário 3.

Cenário 3					
Pontos	Valores modelados				
	h = 4m	h = 6m	h = 8m	h = 10m	h = 12m
P01 – 0 m	80,8	79,0	78,1	77,6	75,8
P07 – 0 m	80,6	78,7	77,8	77,3	75,4
P13 – 7 m	74,6	71,3	69,1	68,4	65,1
P14 – 7 m	73,9	70,7	68,3	67,6	64,3
P01A – 10 m	69,6	66,3	63,8	63,2	60,7
P07A – 10 m	69,0	65,7	63,2	62,6	60,0
P02 – 14 m	67,3	64,1	61,8	61,3	59,1
P08 – 14 m	64,7	61,3	59,2	58,7	56,9
P03 – 28 m	62,1	59,2	57,5	57,2	55,9
P09 – 28 m	57,5	54,9	53,6	53,3	52,5
P10 – 60 m	51,0	49,0	47,9	47,8	47,2
P04 – 60,7 m	52,8	51,7	51,3	51,2	51,0
P05 – 112 m	47,3	46,9	46,8	46,7	46,7
P06 – 227,9 m	39,8	39,3	39,1	38,9	38,9

Conforme definido no item 3.2.1 existem cerca de dois pontos de recepção para uma mesma distância em relação a passagem inferior. Procedeu-se com a média dos valores de ruído destes pontos (Equação 2) e compilou-se todos os resultados obtidos através da simulação do Cenário 3 em uma única análise.

Por meio de tabelas e gráficos, pode-se observar o comportamento da propagação do ruído (Tabela 17 e Figura 17) e da atenuação sonora (Tabela 18 e Figura 18). Estes comportamentos levam em consideração as distâncias entre a barreira e o ponto de recepção e as diferentes alturas de barreiras simuladas.

Também será adicionado está análise os valores obtidos no Cenário 1 (resultado homogeneizado) pois foi a simulação feita com a altura real da passagem inferior,  $h = 8,37$  m e os valores obtidos no Cenário 2 (homogeneizado) pois foi a simulação feita sem a existência da passagem inferior, ou seja, com altura da barreira acústica igual a 0 m.



Tabela 17: Valores em dB(A) para o comportamento da propagação do ruído.

Propagação do ruído – Barreira acústica sem borda							
Distância (m)	h=0m	h = 4m	h = 6m	h = 8m	h = 8,37m	h = 10m	h = 12m
0,0	80,8	80,7	78,9	78,0	77,8	77,5	75,6
7,0	79,3	74,3	71,0	68,7	68,3	68,0	64,7
10,0	76,6	69,3	66,0	63,5	63,2	62,9	60,4
14,0	74,6	66,2	62,9	60,7	60,4	60,2	58,1
28,0	69,8	60,4	57,6	56,0	55,8	55,7	54,5
60,0	60,5	52,0	50,6	49,9	49,8	49,8	49,5
112,0	51,3	47,3	46,9	46,8	46,7	46,7	46,7
227,9	43,4	39,8	39,3	39,1	39,0	38,9	38,9

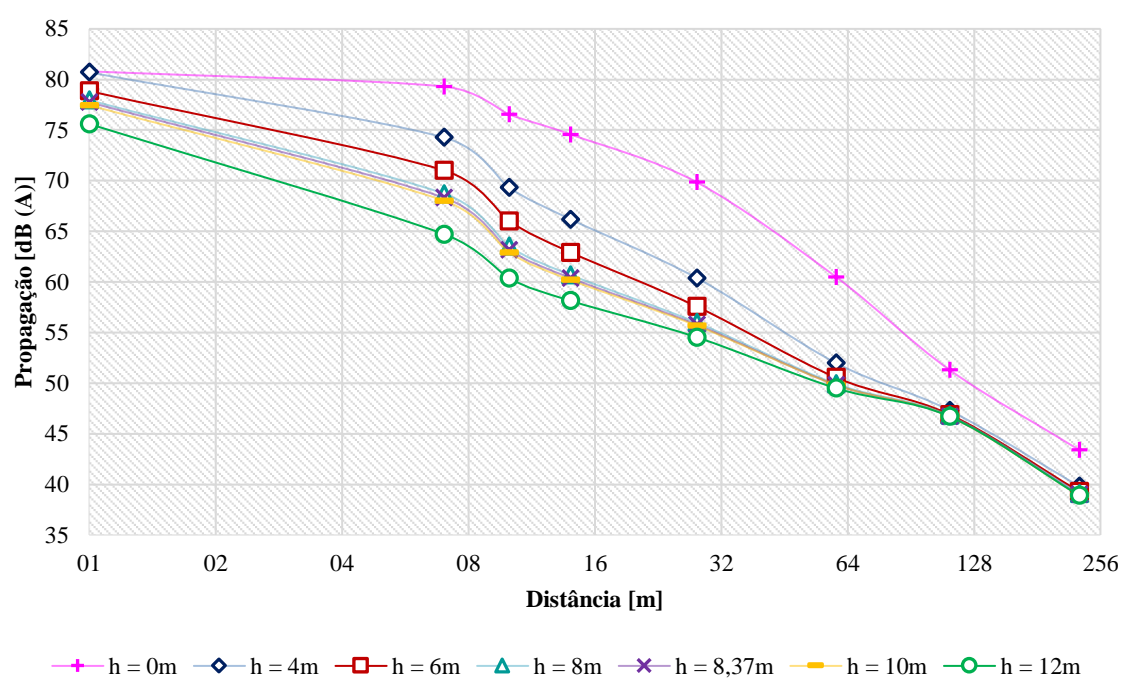


Figura 17: Gráfico evidenciando o comportamento da propagação do ruído da barreira acústica sem borda.

Tabela 18: Valores em dB(A) para o comportamento da atenuação sonora.

Atenuação sonora - Barreira acústica sem borda						
Distância (m)	h = 4m	h = 6m	h = 8m	h = 8,37m	h = 10m	h = 12m
0,0	0,1	1,9	2,8	3,0	3,3	5,2
7,0	5,0	8,3	10,6	11,0	11,3	14,6
10,0	7,2	10,5	13,0	13,4	13,6	16,2
14,0	8,4	11,7	13,9	14,2	14,4	16,4
28,0	9,5	12,3	13,9	14,1	14,2	15,3
60,0	8,5	9,9	10,6	10,7	10,7	11,0
112,0	4,0	4,4	4,5	4,6	4,6	4,6
227,9	3,6	4,1	4,3	4,4	4,5	4,5
<b>Média</b>	<b>6,7</b>	<b>9,2</b>	<b>10,9</b>	<b>11,2</b>	<b>11,4</b>	<b>13,3</b>

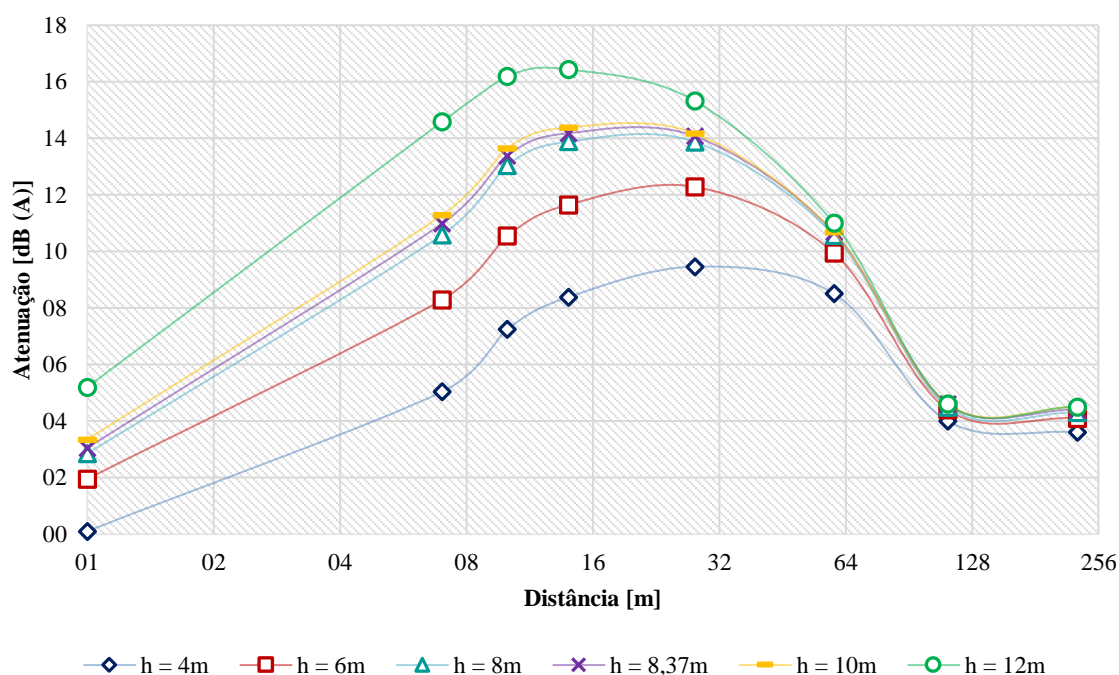


Figura 18: Gráfico evidenciando o comportamento da atenuação sonora ruído da barreira acústica sem borda.

Como já era previsto, a grosso modo, a medida que a passagem inferior tem sua altura acrescida, menor é a propagação do ruído ao longo da distância e maior é a parcela de atenuação sonora.

Constata-se que a partir de uma certa distância, cerca de 112 m, a altura da passagem inferior faz pouca diferença na atenuação do ruído. Essa indiferença é mais acentuada quando a barreira alcança no mínimo 6 m de altura. Ou seja, valor da atenuação é

aproximadamente o mesmo para todas as simulações a partir de 6 m de altura e a uma distância maior que 112 m.

A partir dos gráficos confeccionados, pode-se analisar que não existe uma relação linear entre atenuação *versus* altura, contudo é possível definir a relação altura/atenuação ideal substituindo cálculos numéricos por cálculos gráficos.

Ademais, percebe-se que os resultados encontrados para as barreiras com 8 m, 8,37 m e 10 m de altura são equivalentes entre si. Logo, é mais eficiente economicamente construir barreiras com 8 m de altura pois elas possuem o mesmo poder de atenuação que uma barreira de 10 m de altura.

O Cenário 4 corresponde a situação hipotética na qual foi considerada a BR-230 com barreiras acústicas e com bordas em “L” de 1,10 m de largura, de alturas variando de 4, 6, 8, 10 e 12m. Nele a simulação foi realizada apenas com as médias dos dados dos quatro dias de coletas de tráfego. Ou seja, o mesmo método utilizado para calcular os valores homogêneos do ruído para os Cenários 0, 1, 2 e 3. Na Tabela 19, bem como nas Figuras 42 a 46 (Apêndice B), podem ser observados os resultados desta modelagem.

Tabela 19: Valores em dB(A) para o Cenário 4.

Cenário 4					
Pontos	Valores modelados				
	h = 4m	h = 6m	h = 8m	h = 10m	h = 12m
P01 – 0 m	76,8	73,8	71,4	71,2	71,0
P07 – 0 m	76,5	73,5	71,0	70,7	70,5
P13 – 7 m	70,3	68,0	66,3	66,1	65,9
P14 – 7 m	69,8	67,4	65,7	65,5	65,3
P01A – 10 m	66,9	64,4	63,1	62,9	62,7
P07A – 10 m	66,2	63,7	62,2	62,1	61,9
P02 – 14 m	65,2	62,9	61,7	61,6	61,4
P08 – 14 m	62,8	60,6	59,6	59,5	59,3
P03 – 28 m	61,4	59,7	59,0	58,9	58,9
P09 – 28 m	57,7	56,7	56,2	56,2	56,2
P10 – 60 m	55,1	54,8	54,6	54,6	54,6
P04 – 60,7 m	56,4	56,1	56,0	56,0	56,0
P05 – 112 m	53,6	53,6	53,5	53,5	53,5
P06 – 227,9 m	45,3	45,2	45,1	45,1	45,1

Conforme calculado no Cenário 3, procedeu-se com a média dos valores de ruído destes pontos (Equação 2) e compilou-se todos os resultados obtidos através da simulação do Cenário 4 em uma única análise.

Observa-se o comportamento da propagação do ruído (Tabela 20 e Figura 19) e da atenuação sonora (Tabela 21 e Figura 20). Estes comportamentos levam em consideração as distâncias entre a barreira e o ponto de recepção e as diferentes alturas de barreiras simuladas.

Também será adicionado está análise os valores obtidos no Cenário 0 (resultado homogeneizado) pois foi a simulação feita com a altura real da passagem inferior com borda,  $h = 8,37$  m e os valores obtidos no Cenário 2 (homogeneizado) pois foi a simulação feita sem a existência da passagem inferior, ou seja, com altura da barreira acústica igual a 0 m.

Tabela 20: Valores em dB(A) para o comportamento da propagação do ruído.

Propagação do ruído – Barreira acústica com borda							
<b>Distância (m)</b>	<b>h=0m</b>	<b>h = 4m</b>	<b>h = 6m</b>	<b>h = 8m</b>	<b>h = 8,37m</b>	<b>h = 10m</b>	<b>h = 12m</b>
0,0	80,8	76,7	73,7	71,2	71,0	70,8	70,8
7,0	79,3	70,1	67,7	66,0	65,8	65,6	65,6
10,0	76,6	66,6	64,1	62,7	62,5	62,3	62,3
14,0	74,6	64,2	61,9	60,8	60,7	60,5	60,5
28,0	69,8	59,9	58,5	57,8	57,8	57,8	57,8
60,0	60,5	55,8	55,5	55,4	55,4	55,4	55,4
112,0	51,3	53,6	53,6	53,5	53,5	53,5	53,5
227,9	43,4	45,3	45,2	45,1	45,1	45,1	45,1

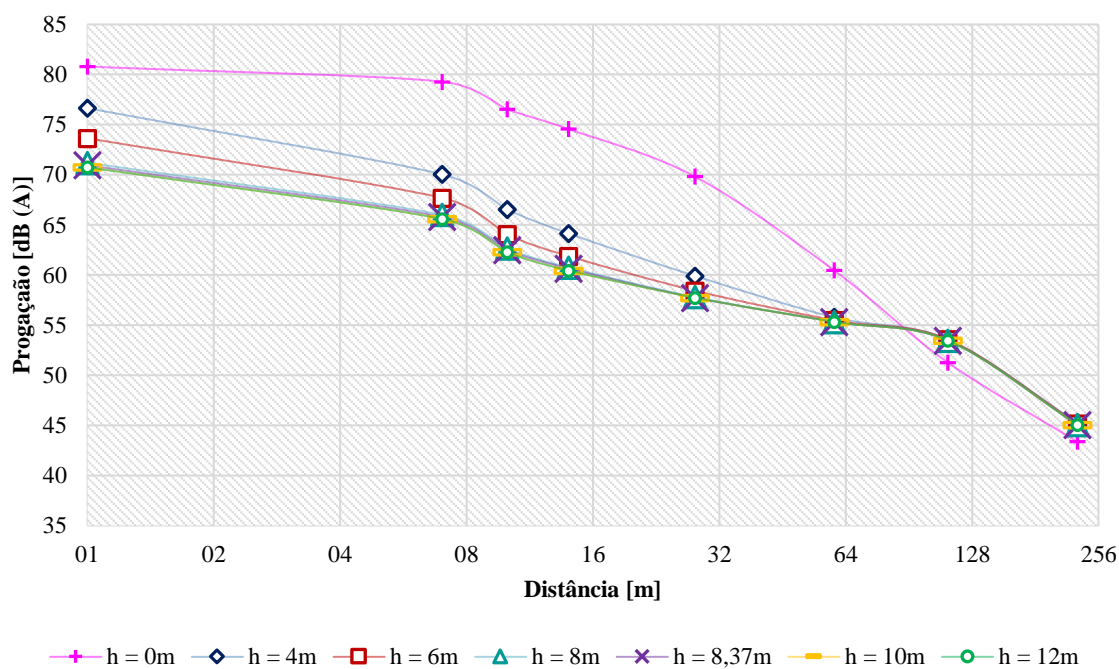


Figura 19: Gráfico evidenciando o comportamento da propagação do ruído da barreira acústica com borda.

Tabela 21: Valores em dB(A) para o comportamento da atenuação sonora.

Atenuação sonora - Barreira acústica com borda						
Distância (m)	h = 4m	h = 6m	h = 8m	h = 8,37m	h = 10m	h = 12m
0,0	4,1	7,1	9,6	9,8	10,0	10,0
7,0	9,2	11,6	13,3	13,5	13,7	13,7
10,0	10,0	12,5	13,9	14,0	14,2	14,2
14,0	10,4	12,7	13,8	13,9	14,1	14,1
28,0	9,9	11,4	12,0	12,1	12,1	12,1
60,0	4,7	5,0	5,1	5,1	5,1	5,1
112,0	-2,3	-2,3	-2,2	-2,2	-2,2	-2,2
227,9	-1,9	-1,8	-1,7	-1,7	-1,7	-1,7
<b>Média</b>	<b>7,6</b>	<b>9,7</b>	<b>10,9</b>	<b>11,1</b>	<b>11,2</b>	<b>11,2</b>

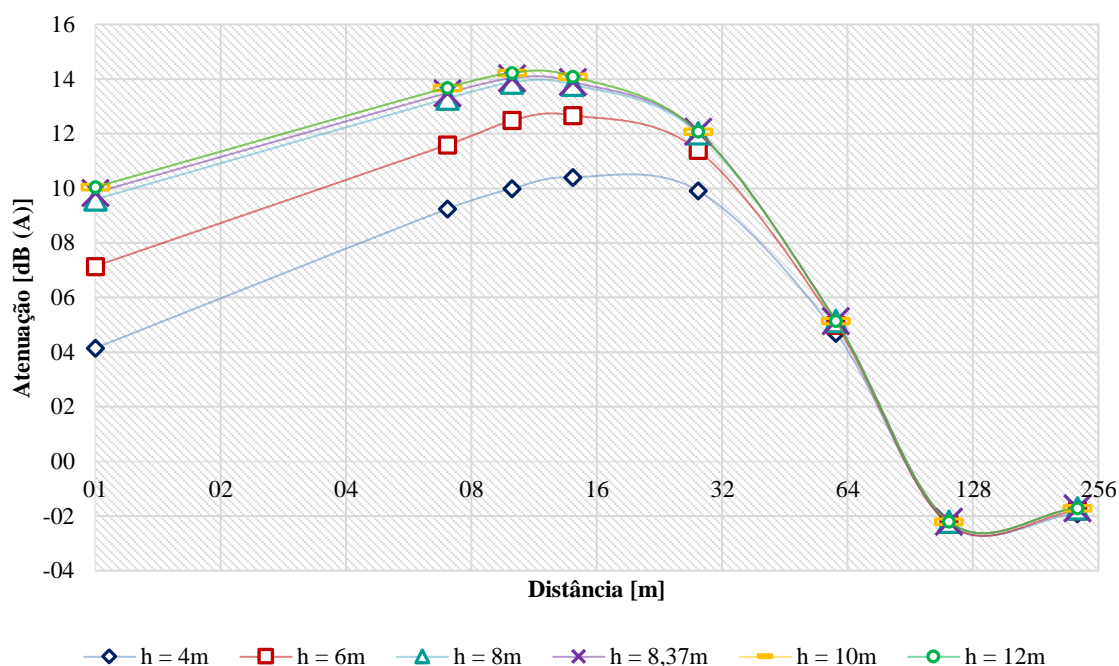


Figura 20: Gráfico evidenciando o comportamento da atenuação sonora ruído da barreira acústica com borda.

Da mesma forma que ocorreu na simulação do Cenário 3, à medida que a passagem inferior tem sua altura acrescida menor é a propagação do ruído ao longo da distância e maior é a parcela de atenuação sonora.

Contudo, para o Cenário 4 as barreiras acústicas com bordas de alturas de 8 m a 12 m forneceram resultados equivalentes tanto para a propagação sonora quanto para a atenuação. Logo, é mais eficiente economicamente construir barreiras com 8 m de altura pois elas possuem o mesmo poder de atenuação que uma barreira de 10 m e 12 m de altura.

Mais uma vez, pode-se analisar que não existe uma relação linear entre atenuação versus altura, contudo é possível definir a relação altura/atenuação ideal substituindo cálculos numéricos por cálculos gráficos.

Para todas as alturas analisadas, a partir de 60 m de distância a altura da passagem inferior com borda faz pouca diferença na atenuação do ruído.

Comparando-se as atenuações médias obtidas nos Cenários 3 e 4, tem-se a situação observada na Tabela 22 e Figura 21. Observa-se que a passagem inferior com borda é mais eficiente para barreiras com altura até 8 m. Entre 8 m e 10 m a eficiência da passagem inferior

com borda e sem borda são equivalentes. A partir de 10 m a passagem inferior sem borda se torna mais eficaz na atenuação sonora.

Tabela 22: Valores em dB(A) da atenuação sonora média.

Atenuação média		
Altura (m)	C3	C4
4,00	6,7	7,6
6,00	9,2	9,7
8,00	10,9	10,9
8,37	11,2	11,1
10,00	11,4	11,2
12,00	13,3	11,2

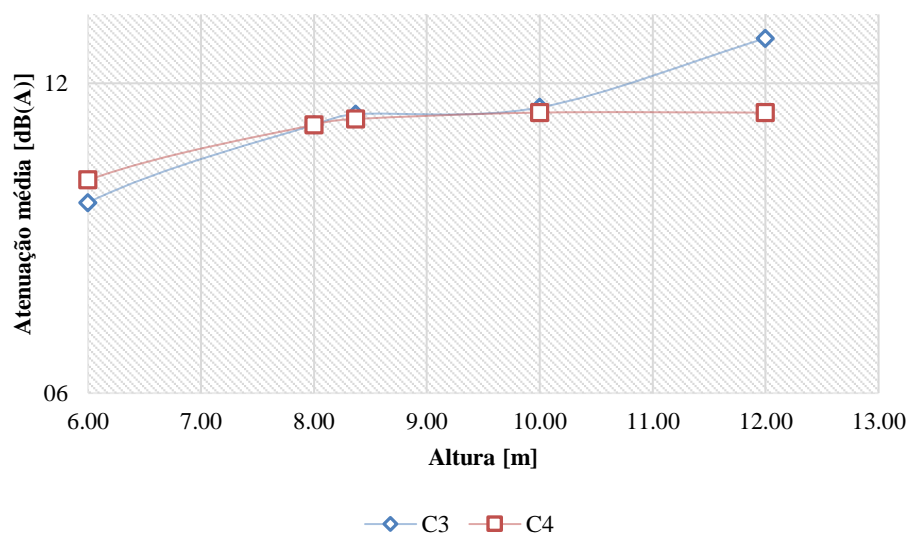


Figura 21: Gráfico evidenciando o comportamento da atenuação sonora média em relação à altura da barreira.

## 5 CONCLUSÃO

Este trabalho avaliou a atenuação acústica de ruído de tráfego devido à passagem inferior, visto que os muros de contenção da passagem podem funcionar como barreiras acústicas. Tal passagem já é utilizada como meio de escoamento rápido em vias expressas de tráfego, mas seu efeito como barreira acústica ainda não tem sido muito explorado. Foram feitas de medições do nível de pressão sonora em pontos de interesse, correlações com expressões da literatura para estimativa do ruído e realização de modelagens computacionais.

Nas predições acústicas, empregando as expressões do modelo CoRTN, os níveis de ruído foram estimados em dois cenários: sem e com a passagem inferior. Para o cenário com a passagem inferior, estimou-se o ruído considerando a difração devido à barreira mais próxima e a reflexão devido à barreira oposta.

Comparando as estimativas feitas com o modelo CoRTN e os valores medidos em campo considerando a passagem inferior, constatou-se que o modelo superestima o ruído. O valor é superestimando, principalmente, para pontos próximos da borda da passagem inferior e para os pontos mais afastados. Esta divergência entre os valores reais e previsto deduz-se pelo fato de que modelo matemático não leva em consideração as edificações e a topografia do terreno. Outra justificativa, que se aplica aos pontos próximos à barreira, vem do fato da existência de uma saliência no topo da barreira (topo em forma de “L”) que não é considerada no modelo do CoRTN. Constatou-se também que, via de regra, a atenuação do nível de pressão sonora é linearmente crescente com a distância.

Quando comparadas as estimativas de ruído sem a passagem inferior com os níveis de ruído medidos com a passagem inferior, pode-se obter uma atenuação média apenas nos pontos em sombra acústica, de 11,8 dB(A).

Nas predições acústicas, empregando o *software* SoundPLAN®, os níveis de ruído foram estimados em cinco cenários: um da situação real e quatro situações hipotéticas. O Cenário 0 corresponde à situação real na qual foi considerada a BR-230 confinada em uma passagem inferior com 8,37 m de altura e topos em “L” de 1,10 m de largura; o Cenário 1 corresponde à situação hipotética na qual foi considerada a BR-230 confinada em uma



passagem inferior com 8,37 m de altura e sem topo; o Cenário 2 corresponde a situação hipotética na qual foi considerada a BR-230 sem barreiras acústicas; o Cenário 3 corresponde a situação hipotética na qual foi considerada a BR-230 com barreiras acústicas sem topo, de alturas variando de 4, 6, 8, 10 e 12 m; e o Cenário 4 corresponde a situação hipotética na qual foi considerada a BR-230 com barreiras acústicas e com topos em “L” de 1,10 m de largura, de alturas variando de 4, 6, 8, 10 e 12 m.

Comparando os resultados obtidos no Cenário 0 e Cenário 1, o uso da borda na barreira acústica mostra-se vantajosa até 10 m de distância, pois a atenuação sonora média aumentou 4,1 dB(A). Para todos os pontos avaliados, a atenuação sonora média aumentou 1,4 dB(A) em relação a situação sem adição de borda. A partir de 14 m de distância o uso da borda é ineficiente já que foram encontrados valores negativos para a atenuação.

Analisando conjuntamente os resultados obtidos nos Cenários 0, 1 e 2 foi calculado a atenuação sonora em relação a situação sem barreiras acústicas. Desta vez, constatou-se que a função que representa a atenuação do nível de pressão sonora é mais próxima ao de uma parábola e não mais de uma função linear crescente. O valor médio de atenuação para os pontos situados na zona de sombra foi de  $IL_1 = 11,9$  dB(A) e  $IL_2 = 12,4$  dB(A). Observa-se que este valor é numericamente próximo ao valor da atenuação obtida utilizando as formulas do CoRTN. As formulas do CoRTN, embora simplificadas, se mostraram confiáveis e possuem resultados representativos se comparados a uma modelagem computacional.

Para um par de barreiras acústicas sem adição de borda (Cenário 3), confirmou-se que a medida que a passagem inferior tem sua altura acrescida, menor é a propagação do ruído ao longo da distância e maior é a parcela de atenuação sonora. Contudo, a partir de 64 m de distância a altura da barreira tem pouca influência na atenuação sonora, principalmente para barreiras a partir de 6m de altura. Pôde-se inferir que não existe uma relação linear entre atenuação versus altura. Neste cenário, percebeu-se que os resultados encontrados para as barreiras com 8 m, 8,37 m e 10 m de altura são equivalentes entre si. Logo, é mais eficiente economicamente construir barreiras com 8 m de altura pois elas possuem o mesmo poder de atenuação que uma barreira de 10 m de altura.

Para um par de barreiras acústicas com adição de borda (Cenário 4), o comportamento se assemelhou ao obtido no Cenário 3. Mas neste caso, as barreiras acústicas com bordas de

alturas de 8 m a 12 m forneceram resultados equivalentes tanto para a propagação sonora quanto para a atenuação. Mais uma vez, é mais eficiente economicamente construir barreiras com 8 m de altura pois elas possuem o mesmo poder de atenuação que uma barreira de até 12 m de altura.

Confrontando os resultados obtidos nos Cenários 3 e 4, observou-se que o uso de bordas em "L" na passagem inferior é mais eficiente para barreiras com altura até 8 m. Entre 8 m e 10 m o desempenho da passagem inferior com borda e sem borda são similares. E a partir de 10 m o uso da passagem inferior sem borda se torna mais eficaz na atenuação sonora.

Diante dos resultados e análises apresentadas, as hipóteses consideradas foram confirmadas. O modelo matemático do CoRTN utilizado conseguiu prever o ruído no entorno da passagem inferior e quantificou sua atenuação sonora. Embora simplificado, tal modelo mostrou ser confiável e possui resultados representativos se comparados a modelagem computacional realizada no SoundPLAN®. Por fim, foi comprovado que o uso da passagem inferior possibilita uma atenuação significativa no nível de pressão sonora, confirmando a sua eficiência como uma solução para a minimização do ruído de tráfego em áreas residenciais com o benefício de ter um reduzido impacto visual.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT (1999). NBR 14313: Barreiras acústicas para vias de tráfego - Características construtivas. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, Rio de Janeiro, 23 p.

ABNT (2000). NBR 10151: Acústica - Avaliação do ruído em áreas habitadas, visando o conforto da comunidade – Procedimento. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, Rio de Janeiro, 4 p.

ARENAS, J.P. (2008). Potential problems with environmental sound barriers when used in mitigating surface transportation noise. **Science of the Total Environment**, Vol. 405, pp. 173 – 179.

AVSAR, Y.; GONULLU, M.T. (2005). Determination of safe distance between roadway and school buildings to get acceptable school outdoor noise level by using noise barriers. **Building and Environment**, Vol. 40, pp. 1255-1260.

BALTRĖNAS, P; BUTKUS, D; NAINYS, V; GRUBLIAUSKAS, R; GUDAITYTĖ, J. (2010). Triukšmo slopinimo sienelės efektyvumo įvertinimas [Efficiency evaluation of a noise barrier]. **Journal of Environmental Engineering and Landscape Management**, Vol. 15, pp. 125–134.

BAULAC, M.; DEFRANCE, J.; JEAN, P. (2008). Optimisation with genetic algorithm of the acoustic performance of T-shaped noise barriers with a reactive top surface. **Applied Acoustics**, Vol. 69, Issue 4, pp. 332-342.

BELDERRAIN, M. L.; VAIDOTAS, R.; MONTEMURRO, W. (2015). Modeling and simulation of noise impact along a new railway section in Sao Paulo, Brazil. INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings. **InterNoise15**, San Francisco-CA, pp. 3322-4303.

BISTAFA, S. R. (2011). Acústica Aplicada ao Controle do Ruído. 2ª edição, **Editora Edgard Blucher**, São Paulo, 384 p.

BRESSANE, A.; MOCHIZUKI, P.S.; CARAM, R.M.; ROVEDA, J.A.F. (2010). Zoneamento ambiental acústico como estratégia de gestão e controle da poluição sonora urbana. **RAEGA – O espaço geográfico em análise**. V. 35 pp. 147-168.

BRÜEL & KJÆR. (2000). Environmental noise. **Brüel & Kjær Sound & Vibration Measurement A/S**, Dinamarca, 65 p.

CARLES, J.L.; BARRIO, I.L.; LUCIO, J.V. (1999). Sound influence on landscape values. **Landscape and Urban Planning**, Vol. 43, Issue 4, pp. 191–200.

CAVALCANTE, B.V.L.; PIMENTEL, R.L.; MELO, R A. ; ARAÚJO, C.A.A. ; SOUSA, R.G. ; GONÇALVES, J.R. ; MENEZES, R. M. (2013). Avaliação do efeito de passagem inferior na redução de ruído de tráfego. **Anais do XXVII ANPET - Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes**, Belém, Vol. 1, pp. 1-11.

CHANG, T.Y.; LIU C.S.; BAO, B.Y.; LI, S.F.; CHEN T.I.; LIN Y.J. (2011). Characterization of road traffic noise exposure and prevalence of hypertension in central Taiwan. **Science Total Environment**, Vol. 409, pp. 1053–1057.

CHAVES, M. S.; BORGES, E. N. M.; AFONSO, M. M. (2012). Atenuação de ruídos por barreiras acústicas usando o método de elementos de contorno. **Anais do XV encontro de modelagem matemática**, Uberlândia, Vol. 1, pp. 1-12.

CHEN, L.; ZHAO, W.; YUAN, X.; ZHOU, B. (2018). Study on the Optimization of the Distribution of Absorbing Material on a Noise Barrier. **Acoustics Australia**, Vol. 46, pp. 119-130.

CIANFRINI, C.; CORCIONE, M.; FONTANA, L. (2007). Experimental verification of the acoustic performance of diffusive roadside noise barriers. **Applied Acoustics**, Vol. 68, pp. 1357-1372.

CONTER, M.; HAIDER, M.; WEHR, R. (2009). Aluminium noise barriers and added devices: a case study using the european standard for in-situ measurements. **Proceedings of the 38th international congress on noise control engineering**, Vol. 1, pp. 3414-3425.

CROMBIE, D.H; HOTHERSALL, D.C.; CHANDLER-WILDE, S.N. (1995). Multiple-Edge Noise Barriers. **Applied Acoustics**, Vol. 44, pp 353-367.

DNIT (2010). IPR - 740: Manual de Projeto Geométrico de Travessias Urbanas. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Ministério dos Transportes**, Rio de Janeiro, 392 p.

DNIT (2015a). ISF - 220: Projeto de Interferências. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Ministério dos Transportes**, Rio de Janeiro, 6 p.

DNIT (2015b). ISF - 223: Projeto de Passagem Inferior. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Ministério dos Transportes**, Rio de Janeiro, 6 p.

DUHAMEL, D.; SERGENT, P.; HUA, D.; CINTRA, D.; (1998). Measurement of active control efficiency around noise barriers. **Applied Acoustics**, Vol. 55, Issue 3, pp. 217-241.

FUJIWARA, K.; HOTHERSALL D.C.; HWAN KIM C. (1998). Noise barriers with reactive surfaces. **Applied Acoustics**, Vol. 53, Issue. 4, pp. 255–72.

GARG, N; MAJI S. (2014). A critical review of principal traffic noise models: Strategies and implications. **Environmental Impact Assessment Review**, Vol. 46, pp. 68-81.

GEORGII, B.; KELLER, V.; PFISTER, H.P.; RECK, H.; PETERS-OSTENBERG, E.; HENNEBERG, M.; HENNEBERG, M.; MUELLER-STIESS, H.; BACH, L. (2011). Use of wildlife passages by invertebrates and vertebrate species. **Wildlife Passages in Germany**, Vol. 1, pp. 1-27.

GERGES, S. N.Y. (2000). Ruído: Fundamentos e Controle. 2ª edição, **Editora UFSC**, Florianópolis, 600 p.

GIL, F.V. (1992). Lãs Carreteras: Sus efectos sobre las águas. **Anais del Simposio sobre carreteras y medio ambiente**. Las Palmas de Gran Canaria, Vol. 1, pp. 197-213.

HALFWERK, W.; HOLLEMANN, L.J.M.; LESSELLS, C.M.; SLABBEKOORN, H. (2011). Negative impact of traffic noise on avian reproductive success. **Journal of Applied Ecology**, Vol. 48, pp. 210-219.

HENDRIKS, R.; RYMER, B.; BUEHLER, D.; ANDREWS, J. (2013). Technical Noise Supplement to the Caltrans Traffic Noise Analysis Protocol-A Guide for the Measuring, Modeling, and Abating Highway Operation and Construction Noise Impacts. **CALTRANS - California Department of Transportation**, Sacramento, 276 p.

HMSO (1988). Calculation of Road Traffic Noise. Department of Transport. London: **Her Majesty's Stationery Office**. London, 94 p.

HONG, J.Y.; JEON, J.Y. (2014). The effects of audio–visual factors on perceptions of environmental noise barrier performance. **Landscape and Urban Planning**, Vol. 125, pp. 28-37.

HOTHERSALL, D.C.; CROMBIE, D.H.; CHANDLER-WILDE, S.N. (1991). The performance of T-profile and associated noise barriers, **Applied Acoustics**, Vol. 32, Issue 4, pp. 269-287.

HOTHERSALL, D.C; CHANDLERWILDE, S.N. (1987). Prediction of the attenuation of road traffic noise with distance. **Journal of Sound and Vibration**, Vol. 115, pp. 459–72.

İLGÜREL, N; AKDAĞ, N. Y.; AKDAĞ, A. (2016). Evaluation of noise exposure before and after noise barriers, a simulation study in Istanbul. **Journal of Environmental Engineering and Landscape Management**, Vol. 24, pp. 293–302.

ISHIZUKA, T.; FUJIWARA, K. (2004). Performance of noise barriers with various edge shapes and acoustical conditions. **Applied Acoustics**, Vol. 65, pp. 125–141.

ISO (1997). ISO 10847: Acoustics - In-situ determination of insertion loss of outdoor noise barriers of all types. **The International Organization for Standardization**, Geneva, 13 p.

ITA (1987). Working group on costs-benefits of underground urban public transportation. Examples of benefits of underground urban public transportation systems. **Tunnelling and Underground Space Technology**, Vol. 2, Issue 1, 1987, pp. 5-54.

JIANG, L.; KANG, J. (2016). Combined acoustical and visual performance of noise barriers in mitigating the environmental impact of motorways. **Science of the Total Environment**, Vol. 543 pp. 52–60.

JOÃO PESSOA. (2016). Mapas de bairros de João Pessoa (JampaMapas). Prefeitura Municipal de João Pessoa – **Secretaria de planejamento**. Disponível em: <<http://geo.joaopessoa.pb.gov.br/digeoc/htmls/jampaemmapas.html>> Acesso em 02 de outubro de 2016.

JUNG, J.K.; PARK, Y.; LEE, S.K.; LEE, H.; PARK, Y.; LEE, J.H.; CHOI, T.Y.; WOO, D. (2016). Response of ground beetles (Coleoptera: Carabidae) to vegetation structure in wildlife crossings. **Korean Journal of Environment and Ecology**, Vol. 30, Issue 2, pp. 185-198.

KANG, J. (2007). Urban sound environment. 1º Edição, **Editora CRC Press**, 304 p.

KASESS, C.H; KREUZER, W.; WAUBKE, H. (2016). Deriving correction functions to model the efficiency of noise barriers with complex shapes using boundary element simulations. **Applied Acoustics**, Vol. 102, pp. 88–99.

KIM, K.H.; YOON, G.H.; (2015). Optimal rigid and porous material distributions for noise

barrier by acoustic topology optimization. **Journal Sound Vibration**, Vol. 339, pp. 123–42.

KNAUER, H., PEDERSEN, S., LEE, C., FLEMING, G. (2000). FHWA highway noise barrier design handbook. Federal Highway Administration, **U.S. Department of Transportation**, 242 p. Disponível em: <<https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/977>> Acesso em 10 de junho de 2017.

KURZE, U.J.; ANDERSON, G.S. (1971). Sound attenuation by barriers. **Applied Acoustics**, Vol. 4, Issue 1, pp. 35-53.

KYÇYKU, A.; LAJQI, S., HOXHA, G. (2016). Analytical calculation of vehicles noise in the road traffic and graphical presentation. **IFAC - International Federation of Automatic Control**, Vol. 49, Issue 29, pp. 52-57.

LAW, C.; LEE, C.; LUI, A. S.; YEUNG, M. K.; LAM, K. (2011). Advancement of three-dimensional noise mapping in Hong Kong. **Applied Acoustics**, Vol. 72, pp. 534–543.

LIAO, S.; CHENG, C.; CHEN, L. (2018). The planning and construction of a large underpass crossing urban expressway in Shanghai: An exemplary solution to the traffic congestions at dead end roads. **Tunnelling and Underground Space Technology**, Vol. 81, pp. 367-381.

MAEKAWA, Z. (1968). Noise reduction by screens. **Applied Acoustics**, Vol. 1, pp. 157-173.

MAY, D.N.; OSMAN, M.M. (1980a). Highway noise barriers: new shapes. **Journal of Sound and Vibration**, Vol. 71, Issue 1, pp. 73-101.

MAY, D.N.; OSMAN, M.M. (1980b). The performance of sound absorptive, reflective, and T-profile noise barriers in Toronto. **Journal of Sound and Vibration**, Vol. 71, Issue 1, pp. 65-71.

MEHTA, M.; J. JOHNSON, J.; J. ROCAFORT. (1999). Architectural Acoustics – Principles and Design. **Prentice-Hall**, USA, 446 p.

MELO, R. A; PIMENTEL, R. L.; LACERDA, D.M.; SILVA, W. M. (2015). Applicability of models to estimate traffic noise for urban roads. **Journal of Environmental Health Science and Engineering**, Vol. 13, pp. 83-89.

MELO, R. A; PIMENTEL, R. L.; SILVA, W. M.; LACERDA, D.M.; (2010). Previsão do nível de pressão sonora gerado pelo tráfego de veículos na cidade de João Pessoa, Brasil. **Anais XVI PANAM**, Lisboa, Vol. 1, pp. 1-18

MURADALI, A.; FYFE, K.R. (1998). A study of 2D and 3D barrier insertion loss using improved diffraction-based methods. **Applied Acoustics**, Vol. 53, Issues 1–3, pp. 49-75.

MURGEL, E. (1999). Influência do uso de pavimento asfáltico poroso com polímero na emissão de ruído de tráfego. **Anais do V SIBRAV – Simpósio de Acústica Veicular**. Vol. 1, pp. 1-6.

NADERZADEH, M.; MONAZZAM, M.R.; NASSIRI, P.; FARD, S.M.B. (2011). Application of perforated sheets to improve the efficiency of reactive profiled noise barriers. **Applied Acoustics**, Vol. 72, Issue 6, pp. 393–398.

ÖGREN, M.; MOLNÁR, P.; BARREGARD, L. (2018). Road traffic noise abatement scenarios in Gothenburg 2015 – 2035. **Environmental Research**, Vol. 164, pp. 516-521.

OLDHAM, D.J.; EGAN, C.A. (2015). A parametric investigation of the performance of multiple edge highway noise barriers and proposals for design guidance. **Applied Acoustics**, Vol. 96, pp. 139–52.

OLIVEIRA NETO, T. (2013). Rodovia Transamazônica: Falência de um grande Projeto Geopolítico. **Revista Geonorte**, Vol. 7, Issue 1, pp. 282-298.

PAZ, E.C.; ZANNIN, P.H.T. (2009). Urban daytime traffic noise prediction models. **Environmental Monitoring and Assessment**. Vol. 163, pp. 515–529.

PERFATER, M.A. (1979). Community perception of noise barriers. Virginia Transportation Research Council, **U.S. Department of Transportation**, 32p. Disponível em: <<https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/18870> > Acesso em 10 de dezembro de 2017.

PIMENTEL, R. P.; MELO, R.A.; CHAVES, G.V.A.; ARAÚJO JR., M.C.; LIMA FILHO, M.R.F. (2007). Impacto gerado por alterações em via urbana no nível de pressão sonora em edificações circunvizinhas. **Anais do XXI ANPET - Congresso Nacional de pesquisa e Ensino de Transportes**, Rio de Janeiro. Vol. 1. pp. 1-8.

POLETTI, J. A. (2011). Análise do ruído e da vibração na utilização de roçadores motorizados. **Anais do XXXI Encontro Nacional de Engenharia de Produção**, Belo Horizonte, Vol. 1, pp. 1-12.

PORTO, H.G. (1999). Pavimentos drenantes. **Editora D&Z Construção Gráfica**, São Paulo, 105 p.

REITER, P.; WEHR, R.; ZIEGELWANGER, H. (2017). Simulation and measurement of noise barrier sound-reflection properties. **Applied Acoustics**, Volume 123, Pages 133-142.

SCHOLLES, W. E. (1971). Field Performance of a Noise Barrier. **Journal of Sound and Vibration**. Vol. 16, pp.627-642.

SEZNEC, R. (1980). Diffraction of sound around barriers: Use of the boundary elements technique. **Journal of Sound and Vibration**, Vol. 73, Issue 2, pp. 195-209.

STEELE, C. (2001). A critical review of some traffic noise prediction models. **Applied Acoustics**, Vol. 62, pp. 271–87.

TADEU, A.; ANTÔNIO, J.; CASTRO, I. (2012). Sound pressure attenuation provided by a 3D rigid acoustic barrier on a building façade: the influence of its longitudinal shape. **Boundary Elements and Other Mesh Reduction Methods**, Vol. 53, pp. 247-259.

TAMER, A. (1970). Transamazônica: Solução para 2001. 2ª edição. **Editora APEC**, Rio de Janeiro, 276 p.

União Europeia (2002). Diretiva 2002/49/EC do parlamento europeu e do conselho, relativa à avaliação e gestão do ruído ambiente. **Jornal Oficial das Comunidades Europeias**, 14 p.

VAITKUS, A.; ANDRIEJAUSKAS, T.; VOROBOVAS, V.; JAGNIATINSKIS, A.; FIKS, B.; ZOFKA, E. (2017). Asphalt wearing course optimization for road traffic noise reduction. **Construction and Building Materials**, Vol. 152, pp. 345-356.

- VAN HAAREN, E.; VAN TOL, P.H. (2000) Validation of ray acoustics applied for the modeling of noise barriers. **Journal of Sound and Vibration**, Vol. 231, pp. 681-688.
- VENCKUS, Ž; GRUBLIAUSKAS, R; VENSLOVAS, A. (2012). The research on the effectiveness of the inclined top type of a noise barrier. **Journal of Environmental Engineering and Landscape Management**, Vol. 20, pp. 155–162.
- WATTS, G.R. (1996). Acoustic Performance of Parallel Traffic Noise Barriers. **Applied Acoustics**, Vol. 47, Issue. 2, pp. 95-119.
- WATTS, G.R. (2002). Barriers designed to reduce road traffic noise. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers**, Vol. 153, Issue 2, pp. 79-86
- WATTS, G.R.; CROMBIE, D.H.; HOTHERSALL, D.C. (1994). Acoustic Performance of New Designs of Traffic Noise Barriers: Full Scale Tests. **Journal of Sound and Vibration**, Vol. 177, Issue 3, pp. 289-305.
- WAY, J.M. (1977). Roadside verges and conservation in Britain: Review. **Biological Conservation**. Vol. 12, Issue 1, pp. 65-74.
- YANG, C., PAN, J., CHENG, L. (2013). A mechanism study of sound wave-trapping barriers. **Journal of the Acoustical Society of America**, Vol. 134, Issue 3, pp. 1960-1969.
- YUZAWA, M.; SONE, T. (1981). Noise reduction by various shapes of barrier. **Applied Acoustics**, Vol. 14, Issue 1, pp. 65–73.
- ZANNIN P.H.T., CALIXTO A., DINIZ F. B. D., FERREIRA J. A. C., SCHULLER R. (2002). Incômodo causado pelo Ruído Urbano à População de Curitiba, PR. **Revista de Saúde Pública**, São Paulo, Vol. 36, Issue 4, pp. 521-524.
- ZANNIN, P.H.T.; SANT'ANA, D.Q. (2011). Noise mapping at different stages of a freeway redevelopment project - A case study in Brazil. **Applied Acoustics**, Vol. 72, Issue 8, pp. 479-486.
- ZANNIN, P.H.T; CALIXTO, A.; DINIZ, F.B.; FERREIRA, J.A.C. (2003). A survey of urban noise annoyance in a large Brazilian city: the importance of a subjective analysis in conjunction with an objective analysis. **Environmental Impact Assessment Review**, Vol. 23, pp. 245-255.
- ZHAO, W.; LIU, E.; POH, H.J.; WANG, B.; GAO, S.; PNG, C.E.; LI, K. W.; CHONG, S. H. (2017). 3D traffic noise mapping using unstructured surface mesh representation of buildings and roads. **Applied Acoustics**, Vol. 127, pp. 297-304.



**APÊNDICE A**  
**ETAPAS DE CALCULO UTILIZANDO AS EQUAÇÕES DO CORTN**

Tabela 23: Cálculo do LAeq previsto desconsiderando a existência da passagem inferior

Dia 1								
Variáveis	P01 - B&K		P02 - Minipa		P03 - Minipa		P04 - Minipa	
Faixas de rodagem	Faixa 1 e 2	Faixa 3 e 4	Faixa 1 e 2	Faixa 3 e 4	Faixa 1 e 2	Faixa 3 e 4	Faixa 1 e 2	Faixa 3 e 4
d = distância entre a fonte e o ponto de recepção (m)	3,27	12,14	17,27	26,14	31,27	40,14	63,97	72,84
h = diferença da altura entre a fonte e o receptor (m)	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Correção dB(A)	2,967	-0,645	-1,874	-3,417	-4,110	-5,096	-6,988	-7,524
L <sub>10</sub> (1h) parcial dB(A)	80,3593	77,3021	75,5177	74,5297	73,2821	72,8505	70,4038	70,4223
L <sub>10</sub> (1h) para as duas faixas dB(A)	79,0943		75,0517		73,0716		70,4131	
LAeq previsto dB(A)	77,1		71,7		69,5		65,4	

Tabela 24: Cálculo do LAeq previsto desconsiderando a existência da passagem inferior

Dia 2								
Variáveis	P01 - B&K		P01A - Minipa		P05 - Minipa		P06 - Minipa	
Faixas de rodagem	Faixa 1 e 2	Faixa 3 e 4	Faixa 1 e 2	Faixa 3 e 4	Faixa 1 e 2	Faixa 3 e 4	Faixa 1 e 2	Faixa 3 e 4
d = distância entre a fonte e o ponto de recepção (m)	3,27	12,14	13,27	22,14	115,27	124,14	231,17	240,04
h = diferença da altura entre a fonte e o receptor (m)	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Correção dB(A)	2,967	-0,645	-0,947	-2,788	-9,444	-9,757	-12,401	-12,562
L <sub>10</sub> (1h) parcial dB(A)	79,8418	76,7374	75,9275	74,5941	67,4306	67,6255	64,4732	64,8197
L <sub>10</sub> (1h) para as duas faixas dB(A)	78,5612		75,3118		67,5291		64,6499	
LAeq previsto dB(A)	76,6		72,7		63,2		60,8	

Tabela 25: Cálculo do LAeq previsto desconsiderando a existência da passagem inferior

Dia 3								
Variáveis	P01 - B&K		P13 - Minipa		P14 - Minipa		P07A - Minipa	
Faixas de rodagem	Faixa 1 e 2	Faixa 3 e 4	Faixa 1 e 2	Faixa 3 e 4	Faixa 1 e 2	Faixa 3 e 4	Faixa 1 e 2	Faixa 3 e 4
d = distância entre a fonte e o ponto de recepção (m)	3,27	12,14	10,27	19,14	10,27	19,14	13,27	22,14
h = diferença da altura entre a fonte e o receptor (m)	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Correção dB(A)	2,967	-0,645	-0,093	-2,248	-0,093	-2,248	-0,947	-2,788
L <sub>10</sub> (1h) parcial dB(A)	80,1762	77,5190	77,1156	75,9156	77,1156	75,9156	76,2620	75,3758
L <sub>10</sub> (1h) para as duas faixas dB(A)	79,0478		76,5569		76,5569		75,8414	
LAeq previsto dB(A)	77,3		74,5		73,6		73,3	

Tabela 26: Cálculo do LAeq previsto desconsiderando a existência da passagem inferior

Dia 4										
Variáveis	P01 - B&K		P07 - Minipa		P08 - Minipa		P09 - Minipa		P10 - Minipa	
Faixas de rodagem	Faixa 1 e 2	Faixa 3 e 4	Faixa 1 e 2	Faixa 3 e 4	Faixa 1 e 2	Faixa 3 e 4	Faixa 1 e 2	Faixa 3 e 4	Faixa 1 e 2	Faixa 3 e 4
d = distância entre a fonte e o ponto de recepção (m)	3,27	12,14	3,27	12,14	17,27	26,14	31,27	40,14	63,27	72,14
h = diferença da altura entre a fonte e o receptor (m)	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Correção dB(A)	2,967	-0,645	2,967	-0,645	-1,874	-3,417	-4,110	-5,096	-6,934	-7,484
L <sub>10</sub> (1h) parcial dB(A)	80,2236	77,1813	80,2236	77,1813	75,3820	74,4090	73,1464	72,7298	70,3134	70,3416
L <sub>10</sub> (1h) para as duas faixas dB(A)	78,9636		78,9636		74,9227		72,9431		70,3276	
LAeq previsto dB(A)	77,3		76,4		72,5		69,6		68,2	

Tabela 27: Cálculo da estimativa do ruído apenas considerando a difração da primeira barreira

Dia 1								
Variáveis	P01 - B&K		P02 - Minipa		P03 - Minipa		P04 - Minipa	
Faixas de rodagem	Faixa 1 e 2	Faixa 3 e 4	Faixa 1 e 2	Faixa 3 e 4	Faixa 1 e 2	Faixa 3 e 4	Faixa 1 e 2	Faixa 3 e 4
d = distância entre a fonte e o ponto de recepção (m)	3,27	12,14	17,27	26,14	31,27	40,14	63,97	72,84
h = diferença da altura entre a fonte e o receptor (m)	9,17	9,17	9,17	9,17	9,17	9,17	9,17	9,17
$\delta$	0,282899	0,6784253	1,7372268	0,5426031	2,4524953	0,9455997	3,0048365	1,3336086
$x = \log(\delta)$	-0,548369	-0,168498	0,2398565	-0,265518	0,3896082	-0,024293	0,4778209	0,1250284
Correção Difração dB(A)	-0,356	-0,044	-17,554	-13,389	-19,093	-15,201	-20,079	-16,478
$L_{10}$ (1h) parcial dB(A)	80,00	77,26	57,96	61,14	54,19	57,65	50,33	53,94
$L_{10}$ (1h) para as duas faixas dB(A)	78,84		59,84		56,26		52,50	
$LA_{eq}$ previsto dB(A)	76,9		57,2		53,5		48,8	

Tabela 28: Cálculo da estimativa do ruído apenas considerando a difração da primeira barreira

Dia 2								
Variáveis	P01 - B&K		P01A - Minipa		P05 - Minipa		P06 - Minipa	
Faixas de rodagem	Faixa 1 e 2	Faixa 3 e 4	Faixa 1 e 2	Faixa 3 e 4	Faixa 1 e 2	Faixa 3 e 4	Faixa 1 e 2	Faixa 3 e 4
d = distância entre a fonte e o ponto de recepção (m)	3,27	12,14	13,27	22,14	115,27	124,14	231,17	240,04
h = diferença da altura entre a fonte e o receptor (m)	9,17	9,17	9,17	9,17	9,17	9,17	9,17	9,17
$\delta$	0,282899	0,6784253	1,3519762	0,3621453	3,2652949	1,547039	3,4358354	1,6995995
$x = \log(\delta)$	-0,548369	-0,168498	0,130969	-0,441117	0,5139224	0,1895013	0,5360323	0,2303466
Correção Difração dB(A)	-0,356	-0,044	-16,532	-12,237	-20,500	-17,071	-20,763	-17,461
$L_{10}$ (1h) parcial dB(A)	79,49	76,69	59,40	62,36	46,93	50,55	43,71	47,36
$L_{10}$ (1h) para as duas faixas dB(A)	78,3102		61,1245		49,1100		45,9068	
$LA_{eq}$ previsto dB(A)	76,3		59,0		46,0		43,2	

Tabela 29: Cálculo da estimativa do ruído apenas considerando a difração da primeira barreira

Dia 3								
Variáveis	P01 - B&K		P13 - Minipa		P14 - Minipa		P07A - Minipa	
Faixas de rodagem	Faixa 1 e 2	Faixa 3 e 4	Faixa 1 e 2	Faixa 3 e 4	Faixa 1 e 2	Faixa 3 e 4	Faixa 1 e 2	Faixa 3 e 4
d = distância entre a fonte e o ponto de recepção (m)	3,27	12,14	10,27	19,14	10,27	19,14	13,27	22,14
h = diferença da altura entre a fonte e o receptor (m)	9,17	9,17	9,17	9,17	9,17	9,17	9,17	9,17
$\delta$	0,282899	0,6784253	0,956979	0,2015663	0,956979	0,2015663	1,3519762	0,3621453
$x = \log(\delta)$	-0,548369	-0,168498	-0,019098	-0,695582	-0,019098	-0,695582	0,130969	-0,441117
Correção Difração dB(A)	-0,356	-0,044	-15,243	-10,783	-15,243	-10,783	-16,532	-12,237
L <sub>10</sub> (1h) parcial dB(A)	79,82	77,48	61,87	65,13	61,87	65,13	59,73	63,14
L <sub>10</sub> (1h) para as duas faixas dB(A)	78,8040		63,8018		63,8018		61,7610	
LA <sub>eq</sub> previsto dB(A)	77,0		62,1		61,3		59,7	

Tabela 30: Cálculo da estimativa do ruído apenas considerando a difração da primeira barreira

Dia 4										
Variáveis	P01 - B&K		P07 - Minipa		P08 - Minipa		P09 - Minipa		P10 - Minipa	
Faixas de rodagem	Faixa 1 e 2	Faixa 3 e 4	Faixa 1 e 2	Faixa 3 e 4	Faixa 1 e 2	Faixa 3 e 4	Faixa 1 e 2	Faixa 3 e 4	Faixa 1 e 2	Faixa 3 e 4
d = distância entre a fonte e o ponto de recepção (m)	3,27	12,14	3,27	12,14	17,27	26,14	31,27	40,14	63,27	72,14
h = diferença da altura entre a fonte e o receptor (m)	9,17	9,17	9,17	9,17	9,17	9,17	9,17	9,17	9,17	9,17
$\delta$	0,282899	0,6784253	0,282899	0,6784253	1,7372268	0,5426031	2,4524953	0,9455997	2,99856	1,32873
$x = \log(\delta)$	-0,548369	-0,168498	-0,548369	-0,168498	0,2398565	-0,265518	0,3896082	-0,024293	0,47691	0,12344
Correção Difração, dB(A)	-0,356	-0,044	-0,356	-0,044	-17,554	-13,389	-19,093	-15,201	-20,068	-16,464
L <sub>10</sub> (1h) parcial dB(A)	79,87	77,14	79,87	77,14	57,83	61,02	54,05	57,53	50,25	53,88
L <sub>10</sub> (1h) para as duas faixas dB(A)	78,7135		78,7135		59,7111		56,1298		52,4308	
LA <sub>eq</sub> previsto dB(A)	77,0		76,1		57,7		53,5		50,8	

Tabela 31: Cálculo da estimativa do ruído considerando a difração e a reflexão das barreiras

Dia 1								
Variáveis	P01 - B&K		P02 - Minipa		P03 - Minipa		P04 - Minipa	
Faixas de rodagem	Faixa 1 e 2	Faixa 3 e 4	Faixa 1 e 2	Faixa 3 e 4	Faixa 1 e 2	Faixa 3 e 4	Faixa 1 e 2	Faixa 3 e 4
W = Y	8,37	8,37	8,37	8,37	8,37	8,37	8,37	8,37
E	22,41	22,41	22,41	22,41	22,41	22,41	22,41	22,41
$\alpha$	9,67	9,67	9,67	9,67	9,67	9,67	9,67	9,67
h	9,17	9,17	9,17	9,17	9,17	9,17	9,17	9,17
d	3,27	12,14	17,27	26,14	31,27	40,14	63,97	72,84
$\beta$	0	0	14	14	28	28	60,7	60,7
$\Theta$	0	0	0	0	0	0	0	0
$\Delta 1$	8,37	8,37	8,37	8,37	8,37	8,37	8,37	8,37
$\Delta 2$	0,5874066	0,5874066	0,5874066	0,5874066	0,5874066	0,5874066	0,5874066	0,5874066
$\Delta 3$	0,1135804	0,1135804	0,0422863	0,0422863	-0,023862	-0,023862	-0,161824	-0,161824
$\Delta 4$	1,1155504	1,1155504	1,1155504	1,1155504	1,1155504	1,1155504	1,1155504	1,1155504
$\Delta 5$	1	1	1	1	1	1	1	1
Reflexão	6,0975151	6,0975151	6,7631987	6,7631987	7,3808322	7,3808322	8,669012	8,669012
L10 (1h) parcial dB(A)	86,10	83,36	64,73	67,90	61,57	65,03	58,99	62,61
L10 (1h) para as duas faixas dB(A)	84,94		66,60		63,64		61,17	
LAeq previsto dB(A)	82,8		63,6		60,5		56,8	

Tabela 32: Cálculo da estimativa do ruído considerando a difração e a reflexão das barreiras

Dia 2								
Variáveis	P01 - B&K		P01A - Minipa		P05 - Minipa		P06 - Minipa	
Faixas de rodagem	Faixa 1 e 2	Faixa 3 e 4	Faixa 1 e 2	Faixa 3 e 4	Faixa 1 e 2	Faixa 3 e 4	Faixa 1 e 2	Faixa 3 e 4
W = Y	8,37	8,37	8,37	8,37	8,37	8,37	8,37	8,37
E	22,41	22,41	22,41	22,41	22,41	22,41	22,41	22,41
$\alpha$	9,67	9,67	9,67	9,67	9,67	9,67	9,67	9,67
h	9,17	9,17	9,17	9,17	9,17	9,17	9,17	9,17
d	3,27	12,14	13,27	22,14	115,27	124,14	231,17	240,04
$\beta$	0	0	10	10	112	112	227,9	227,9
$\Theta$	0	0	0	0	0	0	0	0
$\Delta 1$	8,37	8,37	8,37	8,37	8,37	8,37	8,37	8,37
$\Delta 2$	0,5874066	0,5874066	0,5874066	0,5874066	0,5874066	0,5874066	0,5874066	0,5874066
$\Delta 3$	0,1135804	0,1135804	0,0621023	0,0621023	-0,343665	-0,343665	-0,660223	-0,660223
$\Delta 4$	1,1155504	1,1155504	1,1155504	1,1155504	1,1155504	1,1155504	1,1155504	1,1155504
$\Delta 5$	1	1	1	1	1	1	1	1
Reflexão	6,0975151	6,0975151	6,5781743	6,5781743	10,366882	10,366882	13,322634	13,322634
L10 (1h) parcial dB(A)	85,58	82,79	65,97	68,94	57,30	60,92	57,03	60,68
L10 (1h) para as duas faixas dB(A)	84,41		67,70		59,48		59,23	
LAeq previsto dB(A)	82,3		65,3		55,7		55,7	

Tabela 33: Cálculo da estimativa do ruído considerando a difração e a reflexão das barreiras

Dia 3								
Variáveis	P01 - B&K		P13 - Minipa		P14 - Minipa		P07A - Minipa	
Faixas de rodagem	Faixa 1 e 2	Faixa 3 e 4	Faixa 1 e 2	Faixa 3 e 4	Faixa 1 e 2	Faixa 3 e 4	Faixa 1 e 2	Faixa 3 e 4
W = Y	8,37	8,37	8,37	8,37	8,37	8,37	8,37	8,37
E	22,41	22,41	22,41	22,41	22,41	22,41	22,41	22,41
$\alpha$	9,67	9,67	9,67	9,67	9,67	9,67	9,67	9,67
h	9,17	9,17	9,17	9,17	9,17	9,17	9,17	9,17
d	3,27	12,14	10,27	19,14	10,27	19,14	13,27	22,14
$\beta$	0	0	7	7	7	7	10	10
$\Theta$	0	0	0	0	0	0	0	0
$\Delta 1$	8,37	8,37	8,37	8,37	8,37	8,37	8,37	8,37
$\Delta 2$	0,5874066	0,5874066	0,5874066	0,5874066	0,5874066	0,5874066	0,5874066	0,5874066
$\Delta 3$	0,1135804	0,1135804	0,0772493	0,0772493	0,0772493	0,0772493	0,0621023	0,0621023
$\Delta 4$	1,1155504	1,1155504	1,1155504	1,1155504	1,1155504	1,1155504	1,1155504	1,1155504
$\Delta 5$	1	1	1	1	1	1	1	1
Reflexão	6,0975151	6,0975151	6,436744	6,436744	6,436744	6,436744	6,5781743	6,5781743
L10 (1h) parcial dB(A)	85,92	83,57	68,31	71,57	68,31	71,57	66,31	69,72
L10 (1h) para as duas faixas dB(A)	84,90		70,24		70,24		68,34	
LAeq previsto dB(A)	83,0		68,3		67,5		66,0	



Tabela 34: Cálculo da estimativa do ruído considerando a difração e a reflexão das barreiras

Dia 4										
Variáveis	P01 - B&K		P07 - Minipa		P08 - Minipa		P09 - Minipa		P10 - Minipa	
Faixas de rodagem	Faixa 1 e 2	Faixa 3 e 4	Faixa 1 e 2	Faixa 3 e 4	Faixa 1 e 2	Faixa 3 e 4	Faixa 1 e 2	Faixa 3 e 4	Faixa 1 e 2	Faixa 3 e 4
W = Y	8,37	8,37	8,37	8,37	8,37	8,37	8,37	8,37	8,37	8,37
E	22,41	22,41	22,41	22,41	22,41	22,41	22,41	22,41	22,41	22,41
$\alpha$	9,67	9,67	9,67	9,67	9,67	9,67	9,67	9,67	9,67	9,67
h	9,17	9,17	9,17	9,17	9,17	9,17	9,17	9,17	9,17	9,17
d	3,27	12,14	3,27	12,14	17,27	26,14	31,27	40,14	63,27	72,14
$\beta$	0	0	0	0	14	14	28	28	60,0	60,0
$\Theta$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$\Delta 1$	8,37	8,37	8,37	8,37	8,37	8,37	8,37	8,37	8,37	8,37
$\Delta 2$	0,5874066	0,5874066	0,5874066	0,5874066	0,5874066	0,5874066	0,5874066	0,5874066	0,5874066	0,5874066
$\Delta 3$	0,1135804	0,1135804	0,1135804	0,1135804	0,0422863	0,0422863	-0,023862	-0,023862	-0,15908	-0,15908
$\Delta 4$	1,1155504	1,1155504	1,1155504	1,1155504	1,1155504	1,1155504	1,1155504	1,1155504	1,1155504	1,1155504
$\Delta 5$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Reflexão	6,0975151	6,0975151	6,0975151	6,0975151	6,7631987	6,7631987	7,3808322	7,3808322	8,643383	8,643383
L10 (1h) parcial dB(A)	85,96	83,24	85,96	83,24	64,59	67,78	61,43	64,91	58,89	62,52
L10 (1h) para as duas faixas dB(A)	84,81		84,81		66,47		63,51		61,07	
LAeq previsto dB(A)	83,0		82,0		64,3		60,6		59,2	

**APÊNDICE B**  
**MAPAS ACUSTICOS GERADOS PELO SOUNDPLAN**

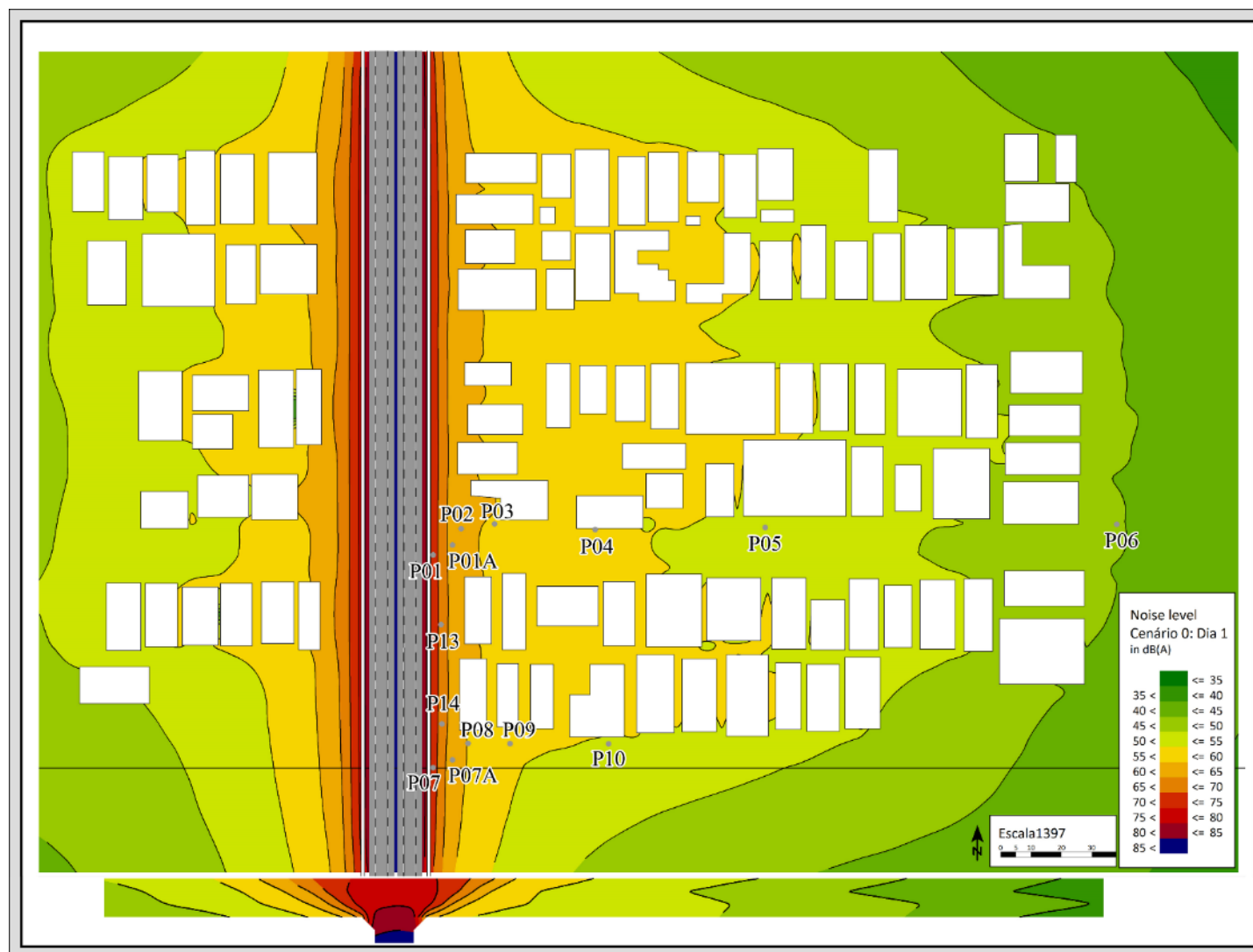


Figura 22: Mapa acústico do Cenário 0 no Dia 1.

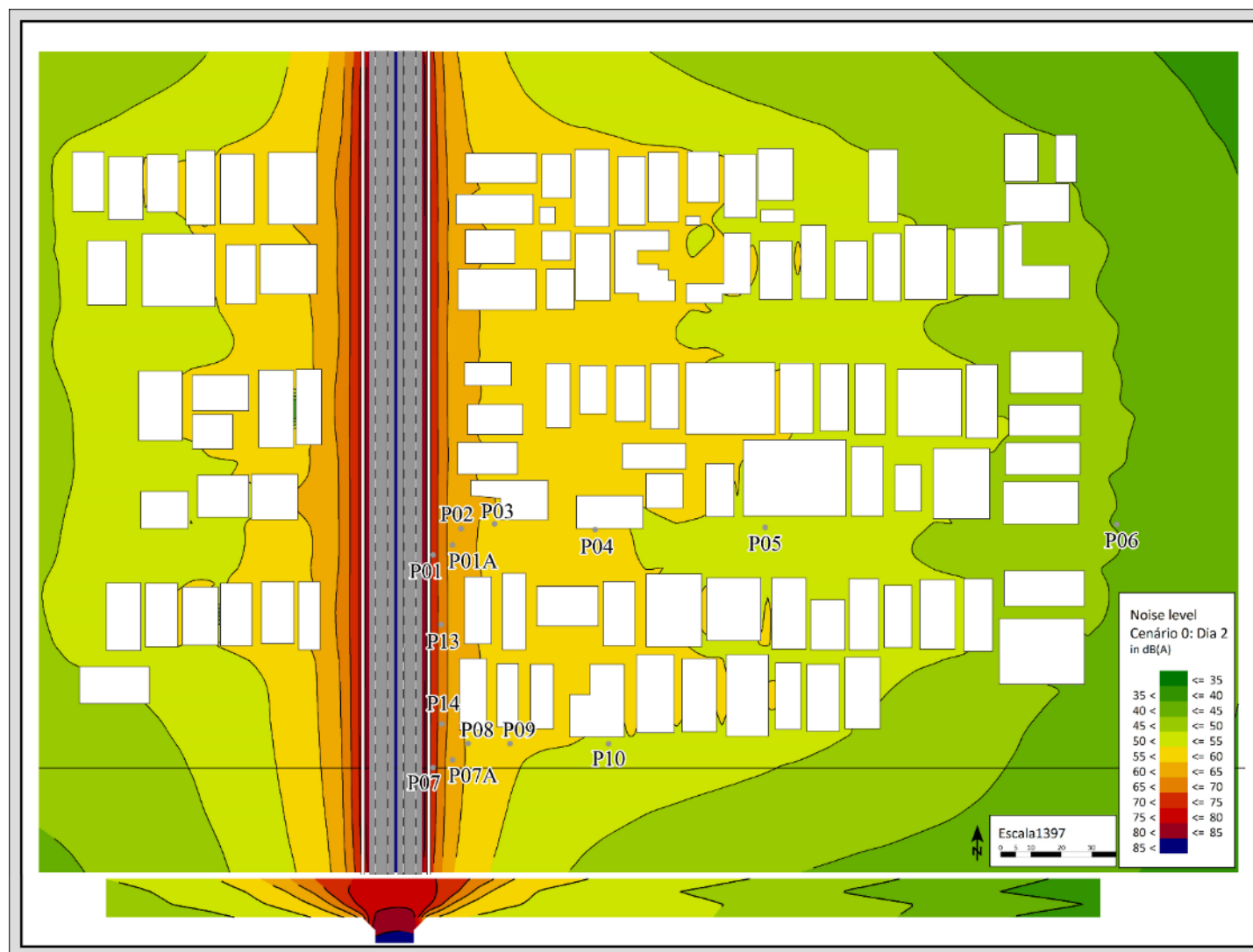


Figura 23: Mapa acústico do Cenário 0 no Dia 2.

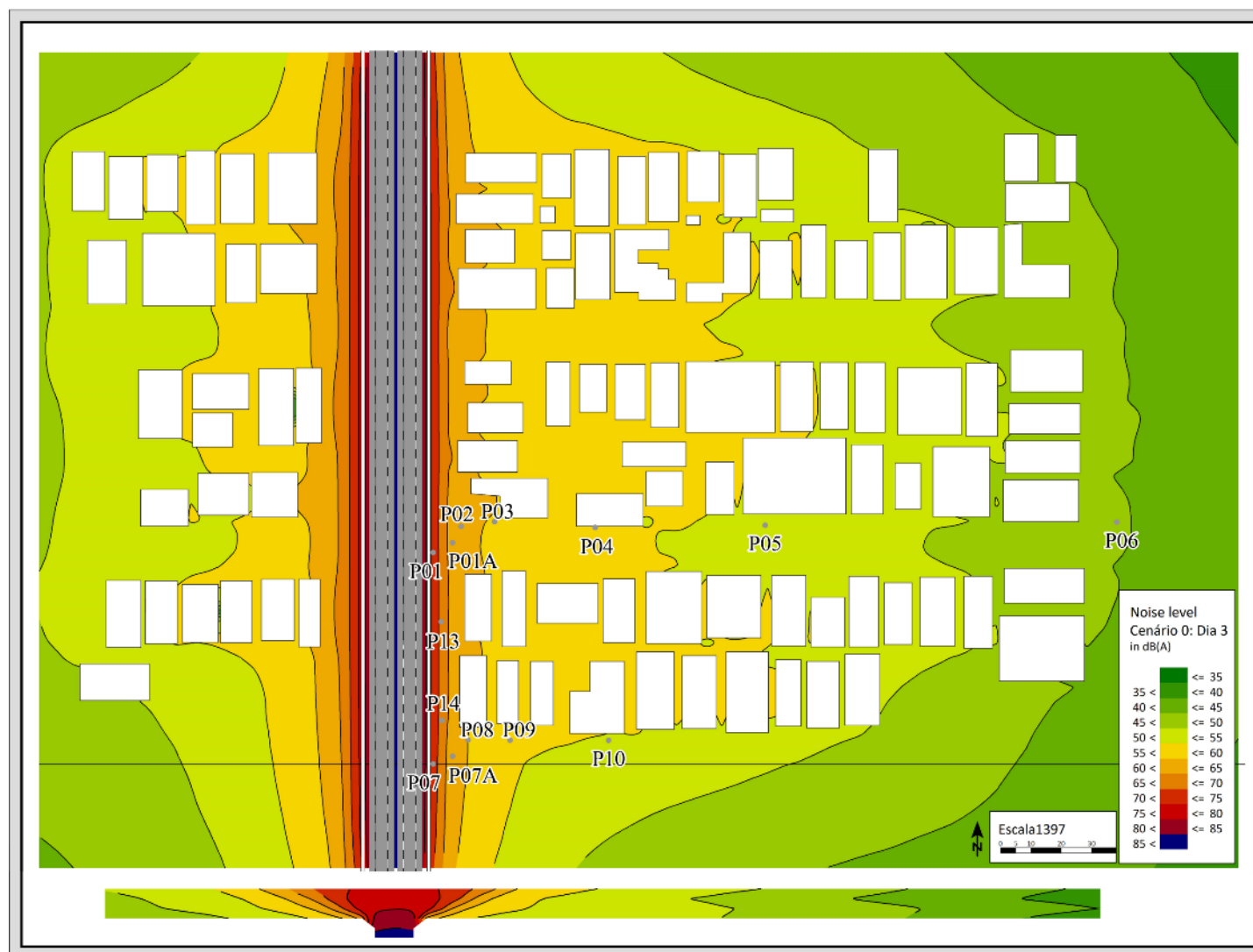


Figura 24: Mapa acústico do Cenário 0 no Dia 3.

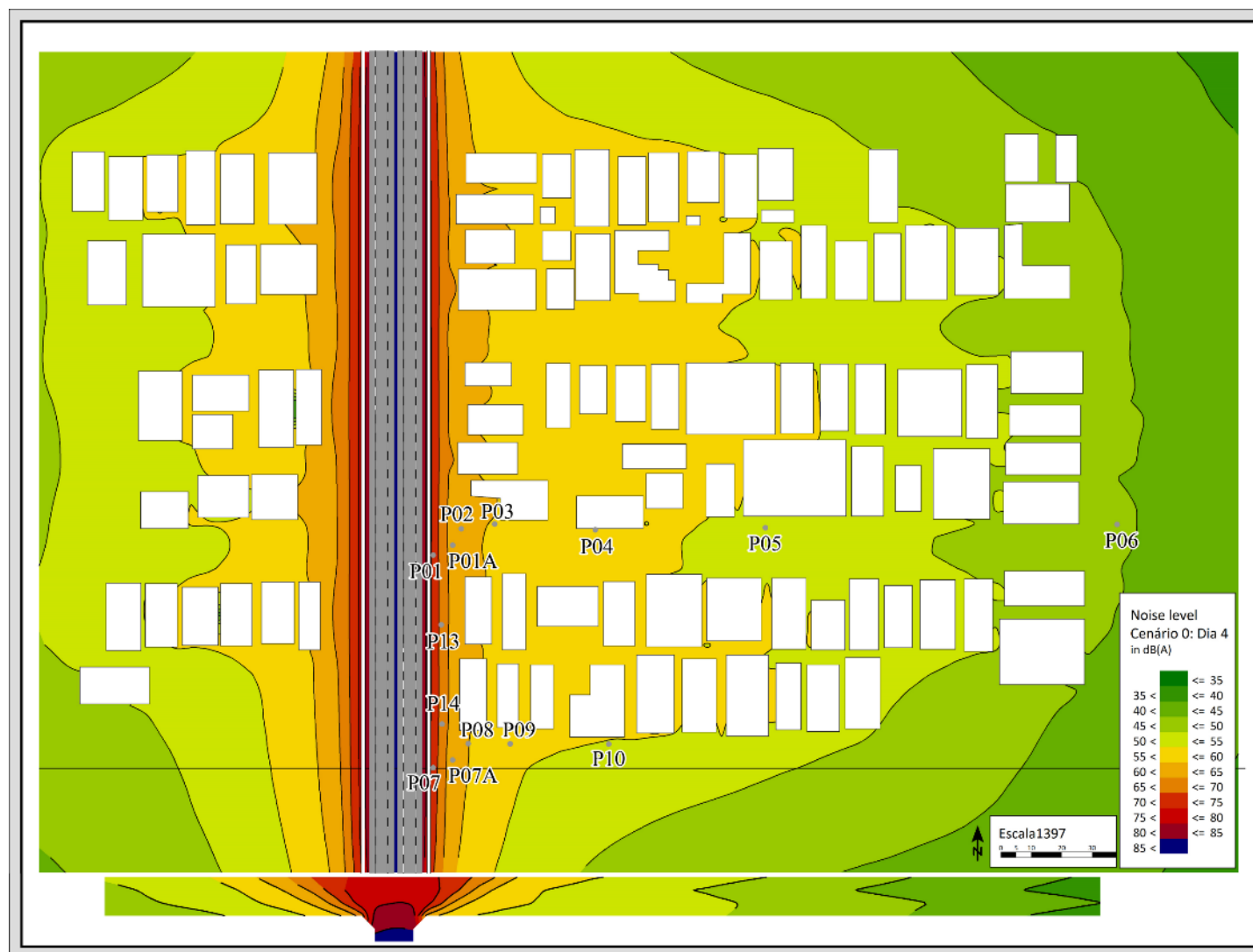


Figura 25: Mapa acústico do Cenário 0 no Dia 4.

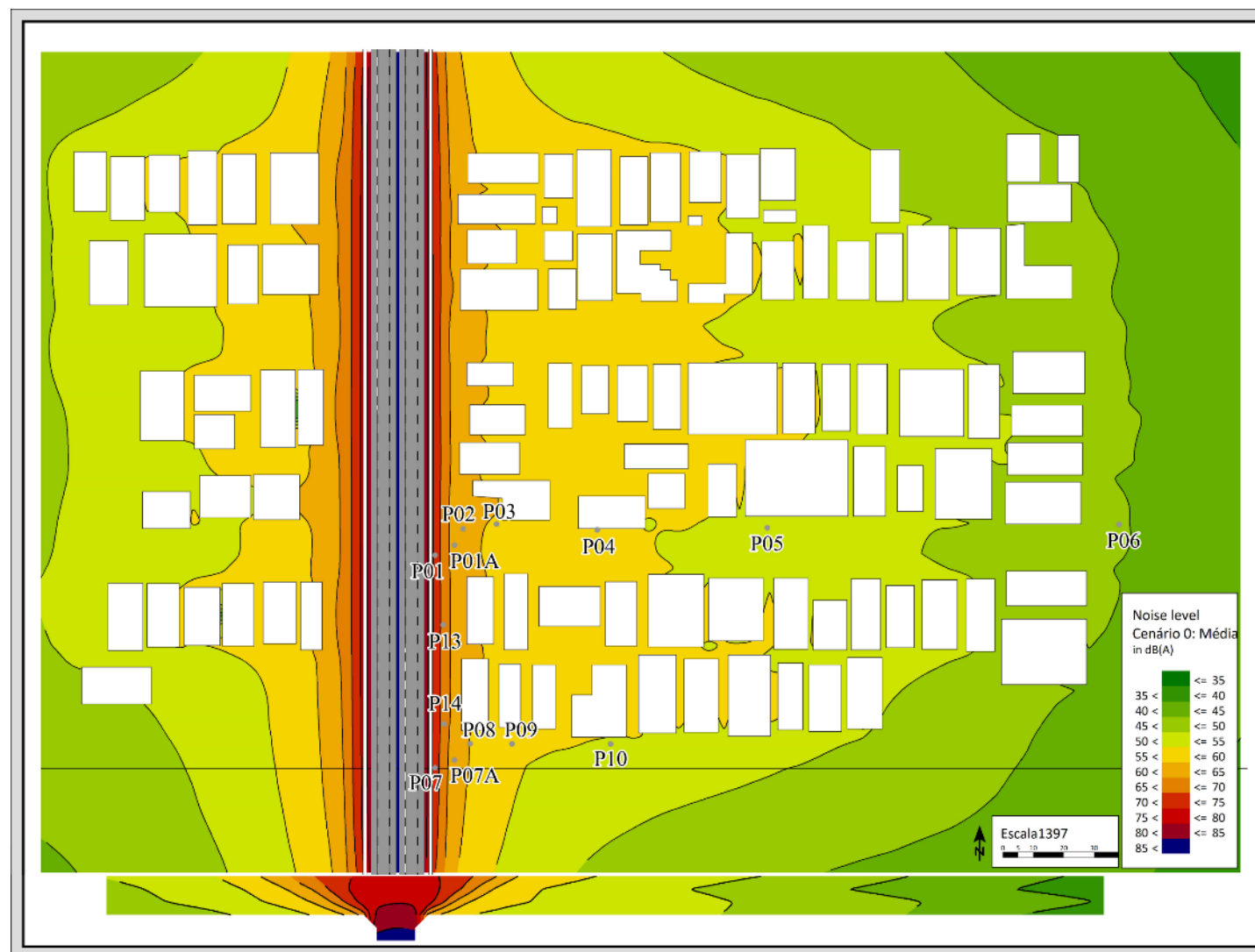


Figura 26: Mapa acústico do Cenário 0 homogeneizado, média do tráfego.

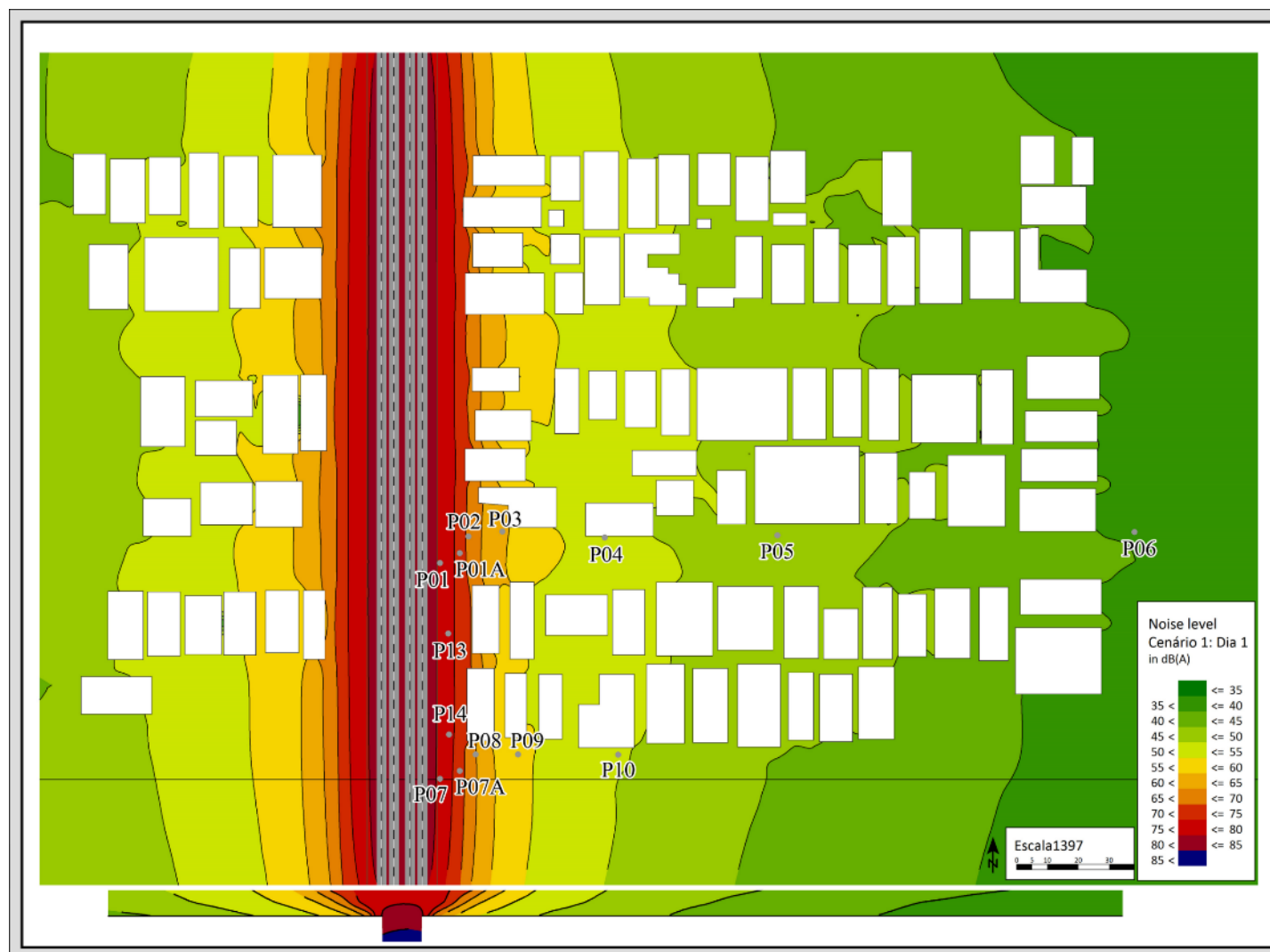


Figura 27: Mapa acústico do Cenário 1 no Dia 1.



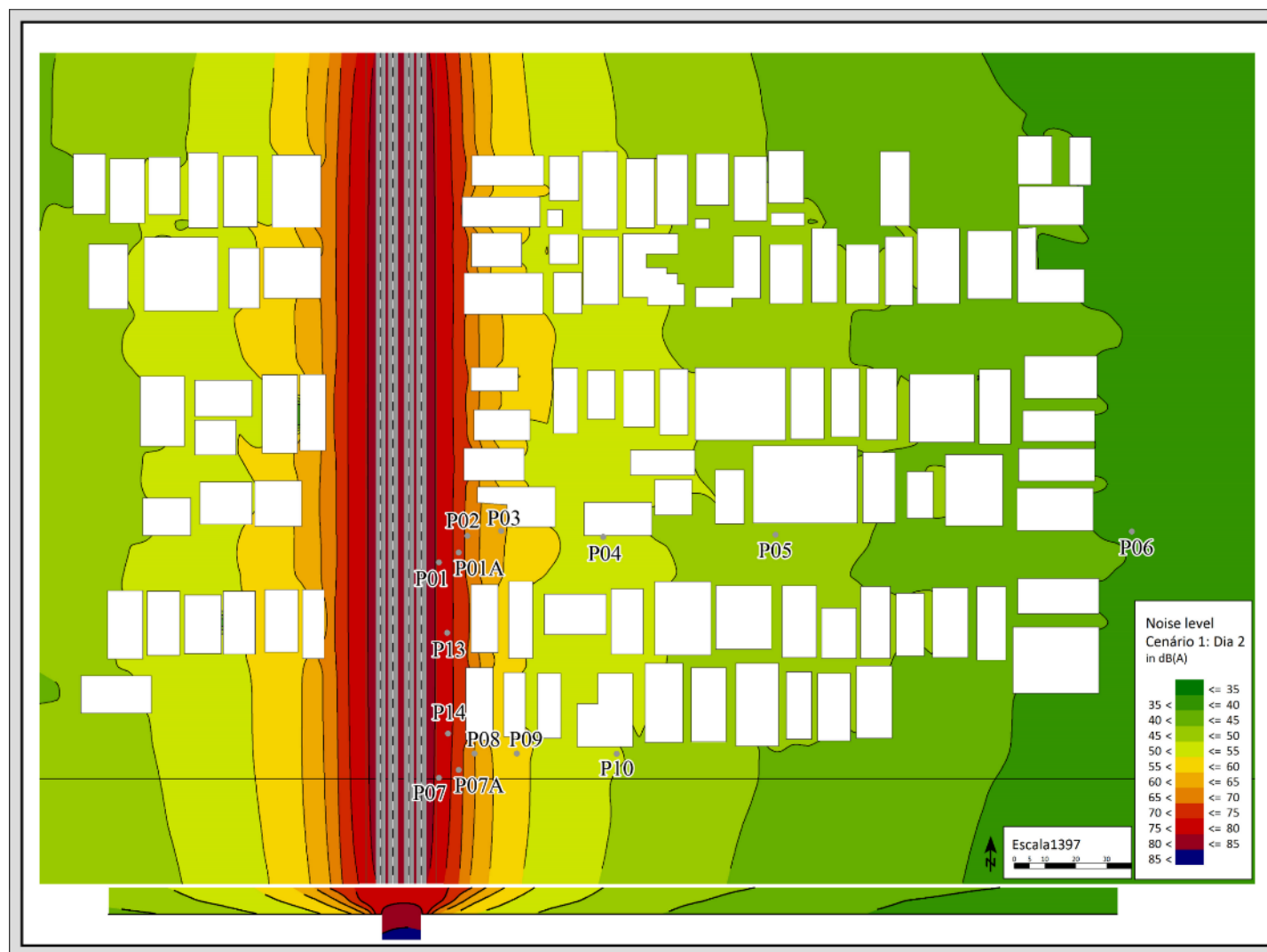


Figura 28: Mapa acústico do Cenário 1 no Dia 2.

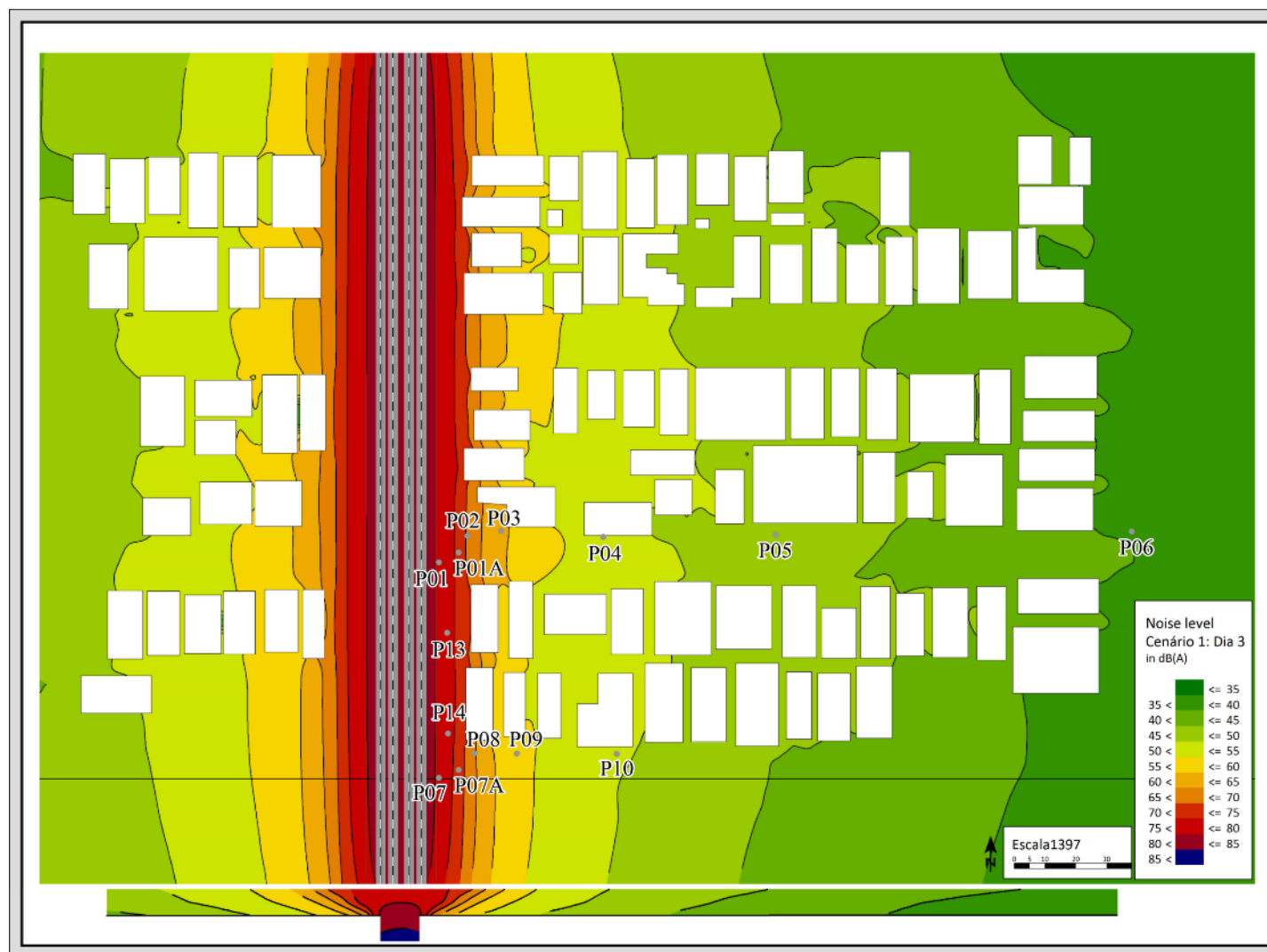


Figura 29: Mapa acústico do Cenário 1 no Dia 3.

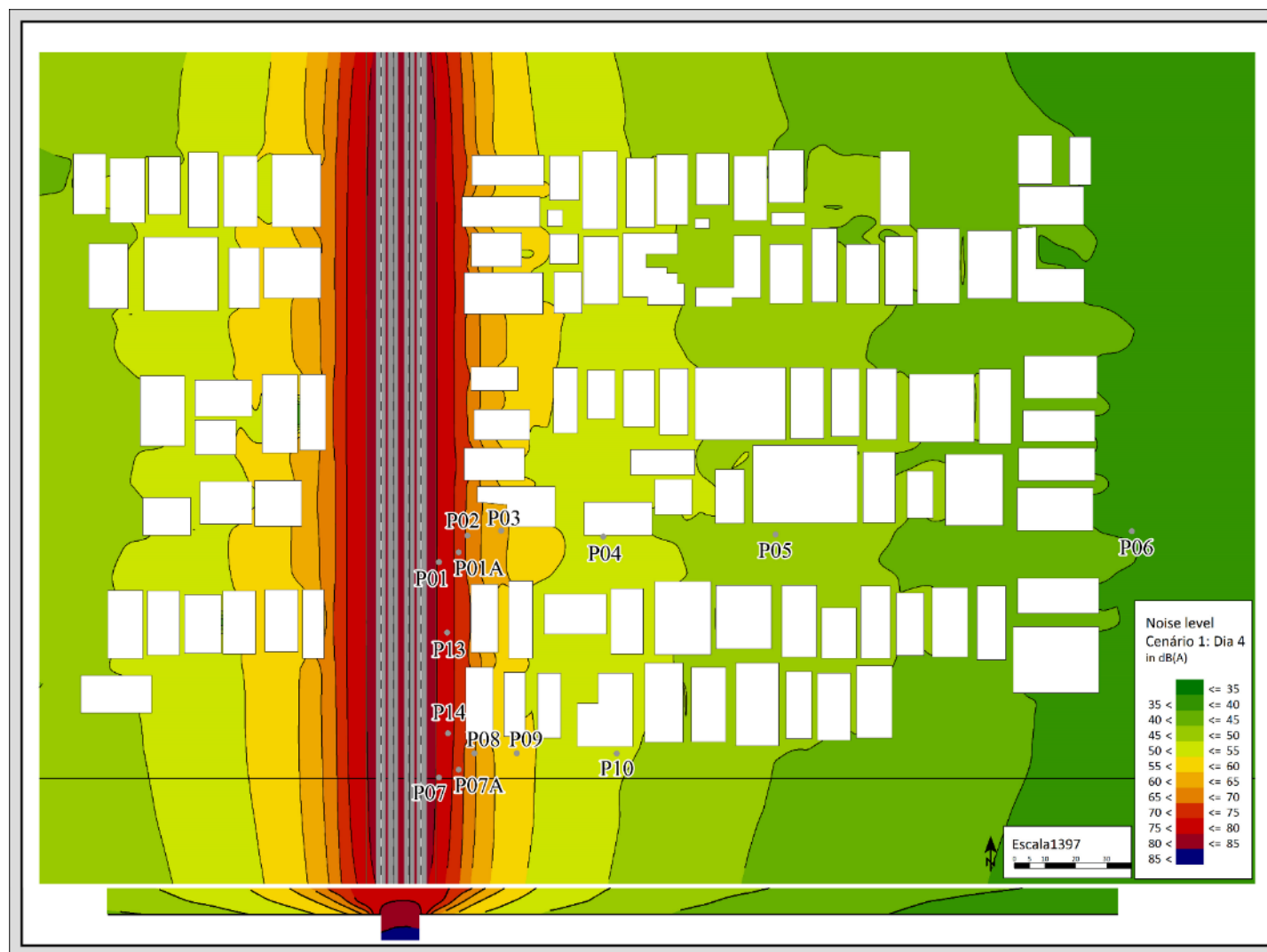


Figura 30: Mapa acústico do Cenário 1 no Dia 4.

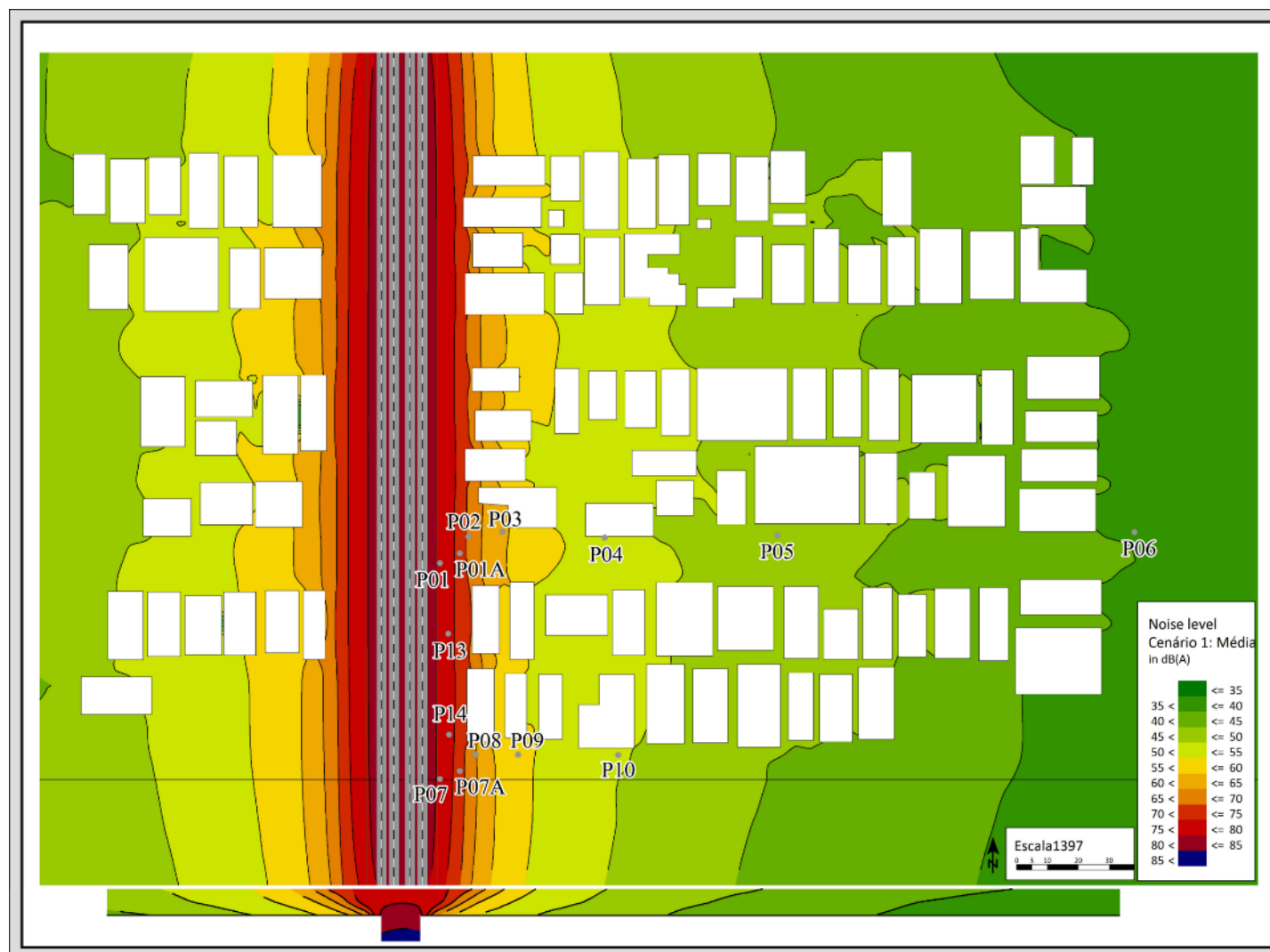


Figura 31: Mapa acústico do Cenário 1 homogeneizado, média do tráfego.

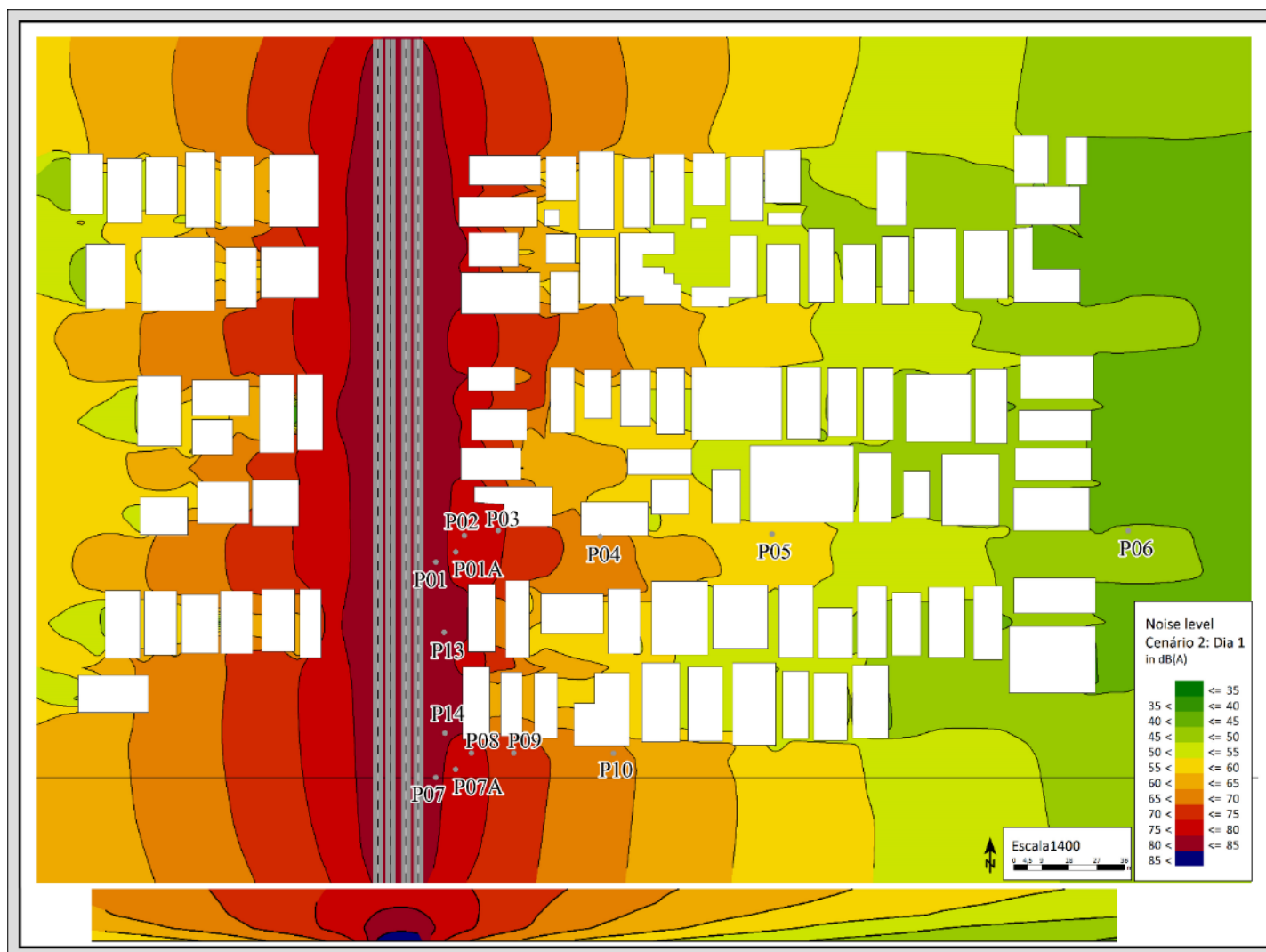


Figura 32: Mapa acústico do Cenário 2 no Dia 1.

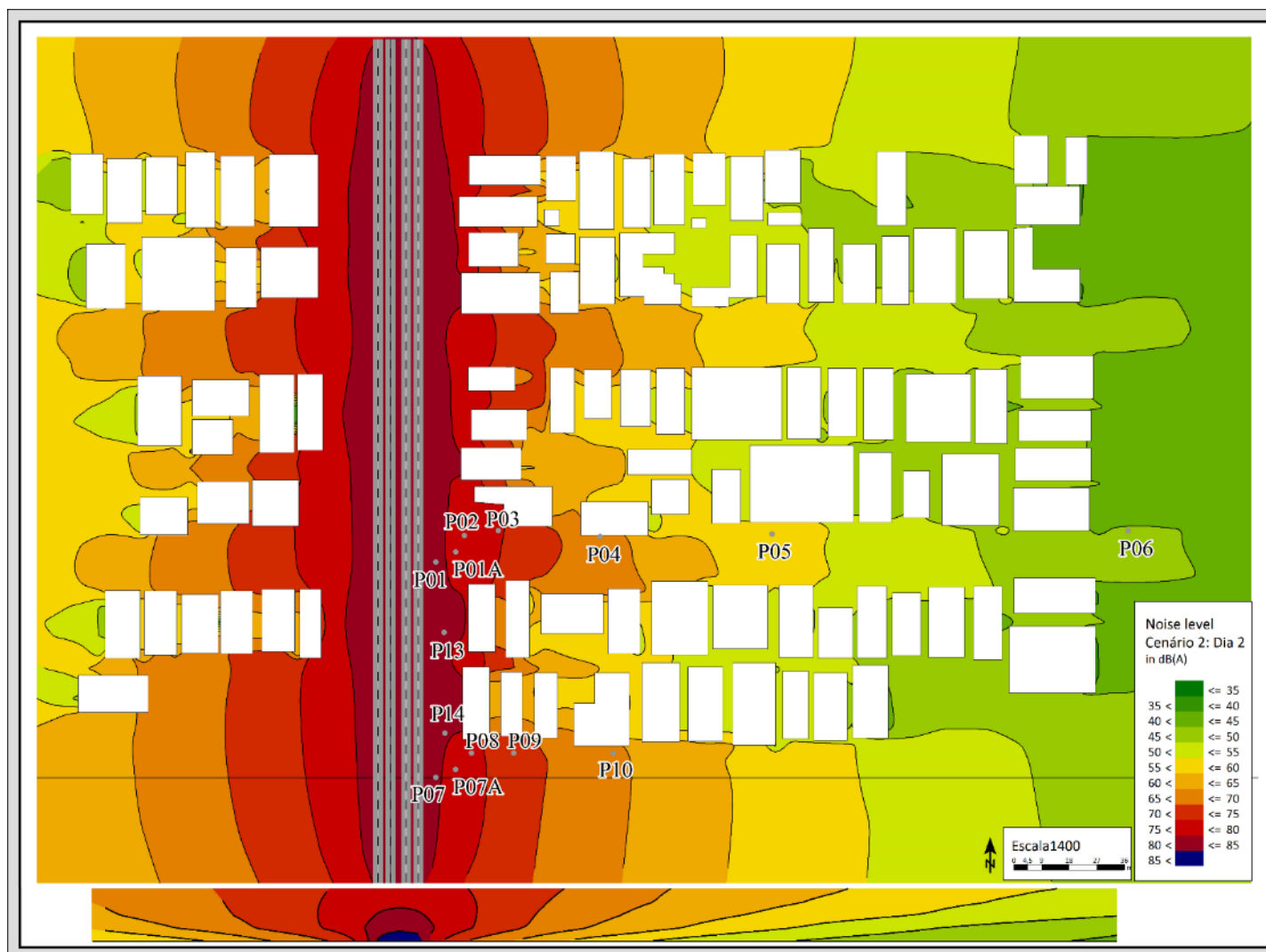


Figura 33: Mapa acústico do Cenário 2 no Dia 2.

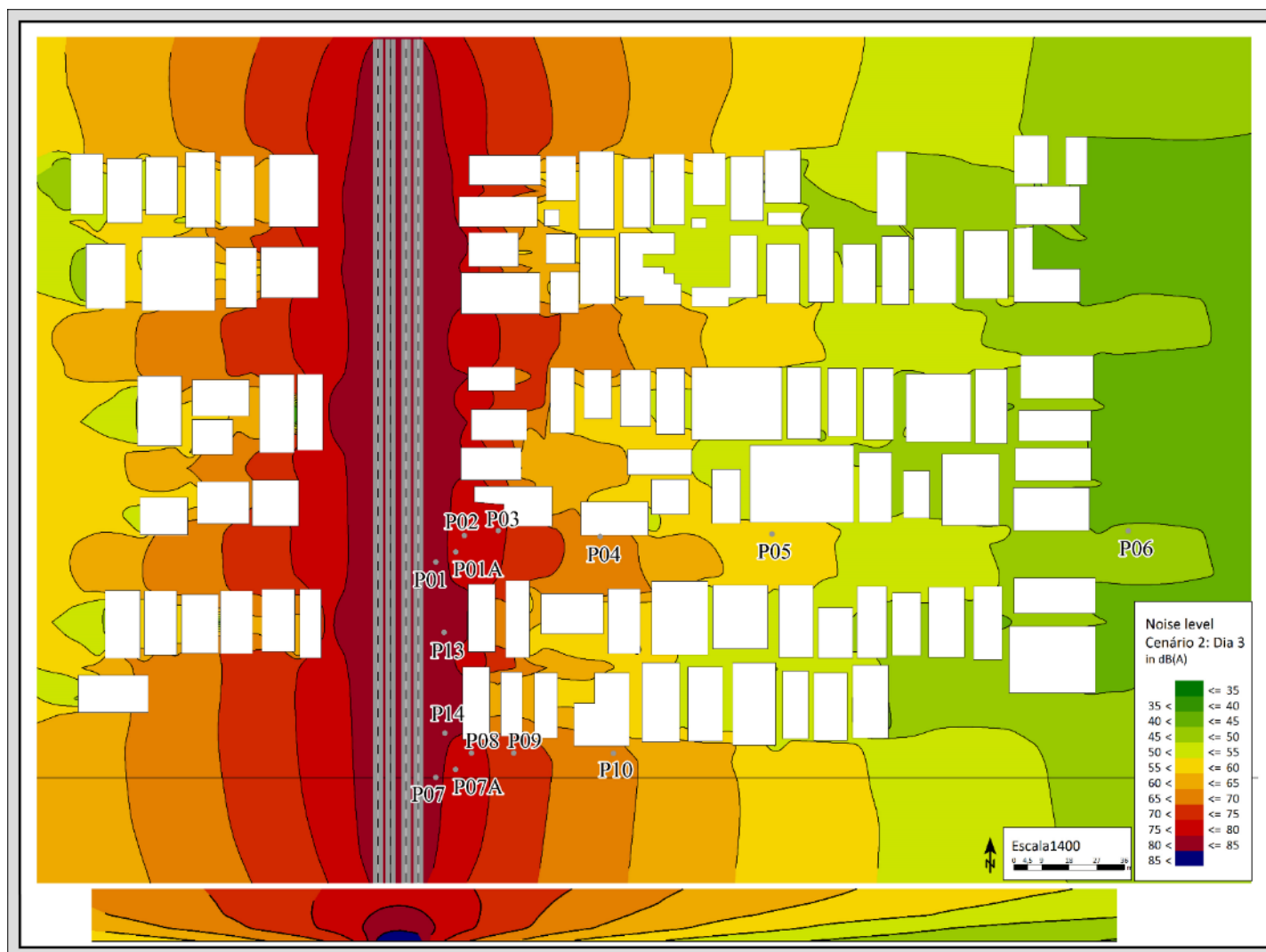


Figura 34: Mapa acústico do Cenário 2 no Dia 3.

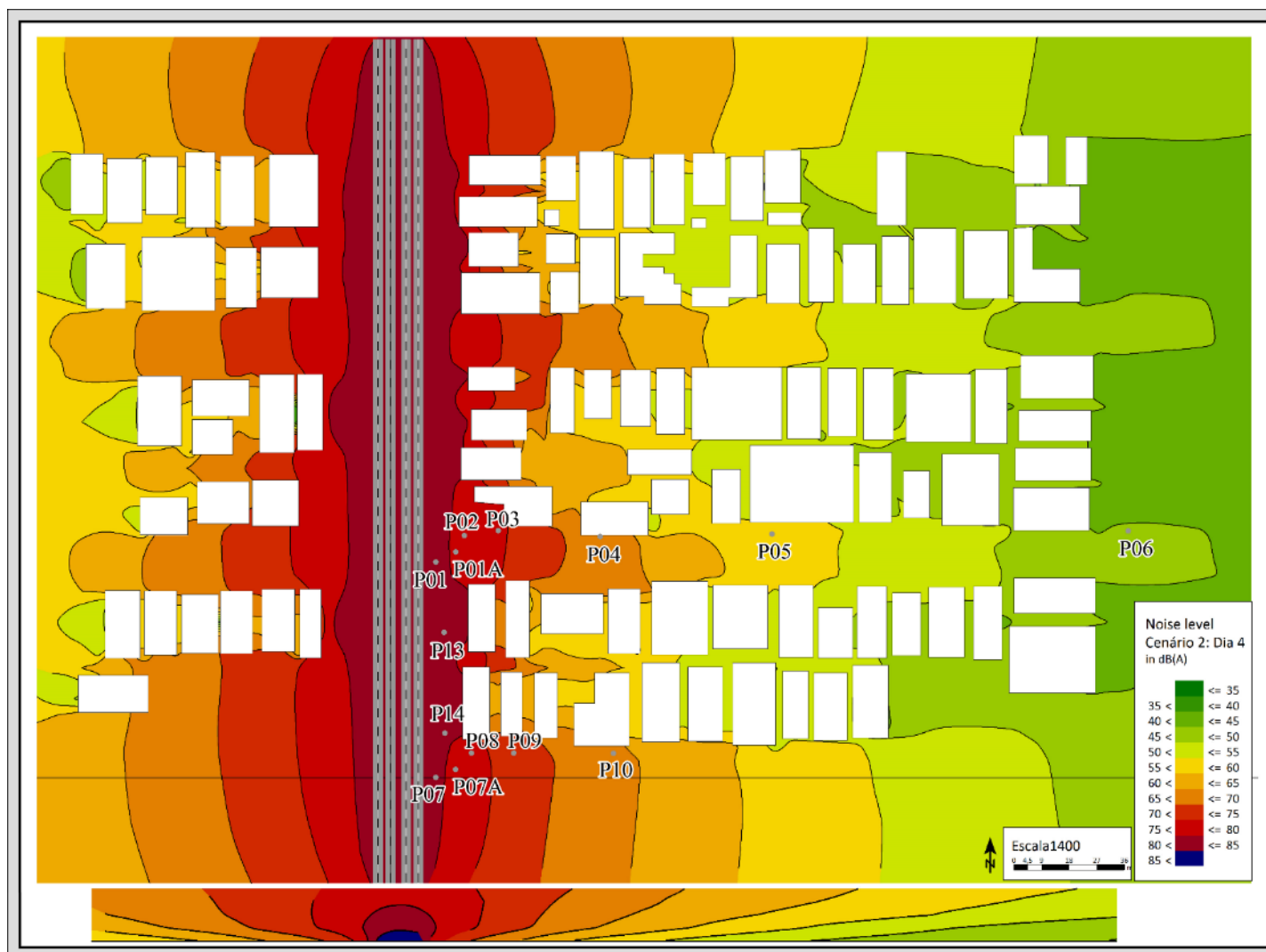


Figura 35: Mapa acústico do Cenário 2 no Dia 4.



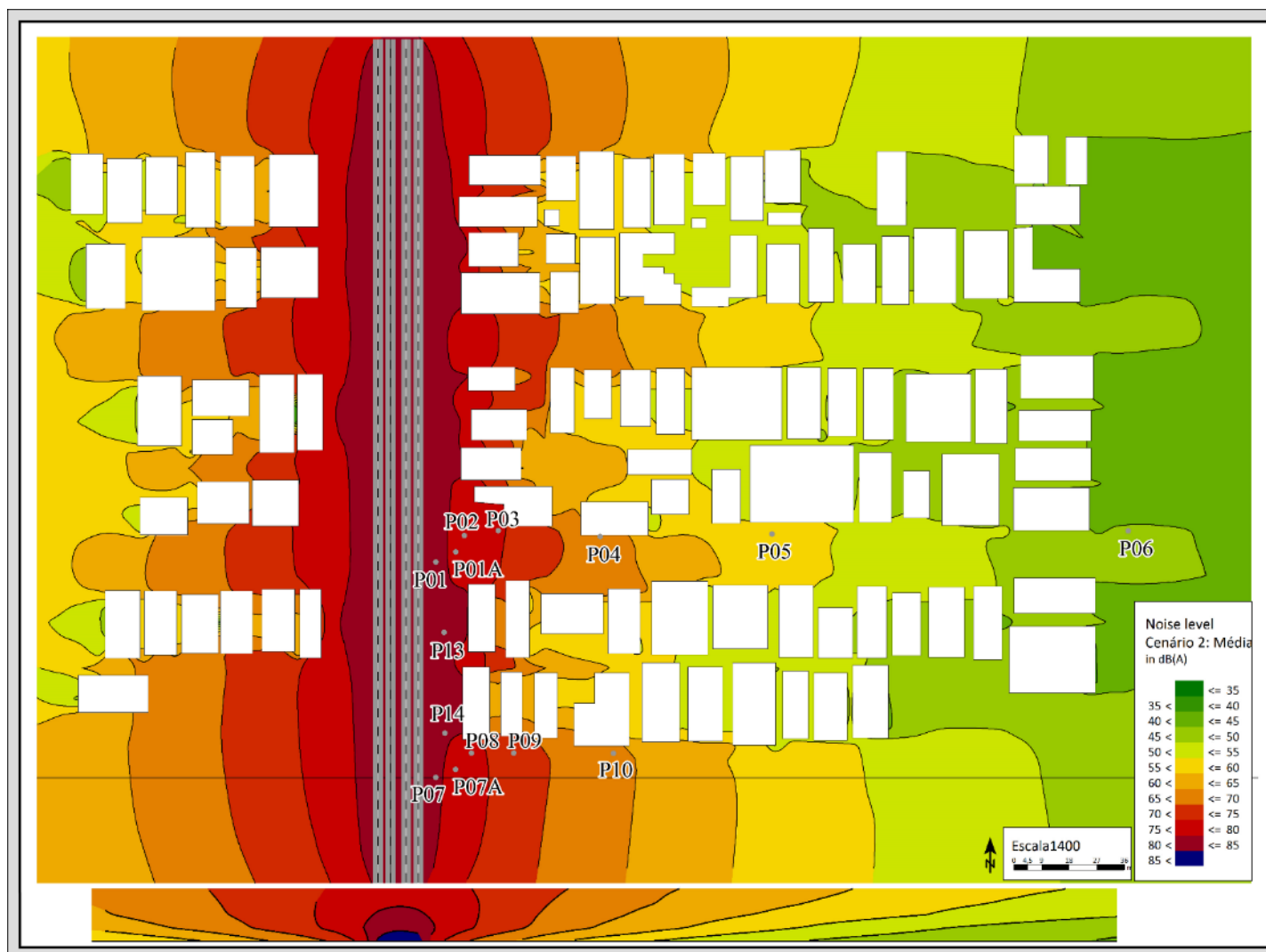


Figura 36: Mapa acústico do Cenário 2 homogeneizado, média do tráfego

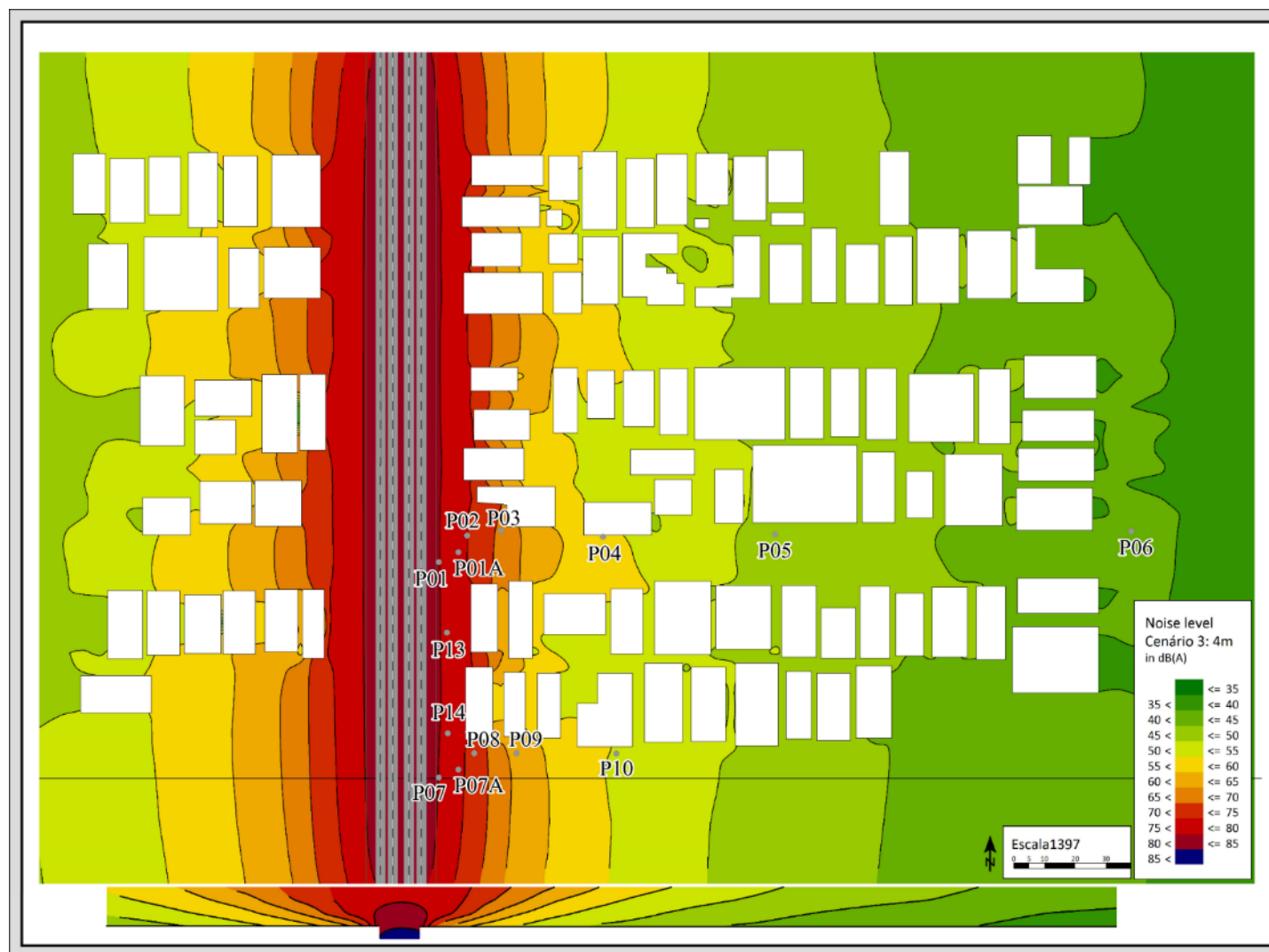


Figura 37: Mapa acústico do Cenário 3, passagem inferior com 4 m de altura.

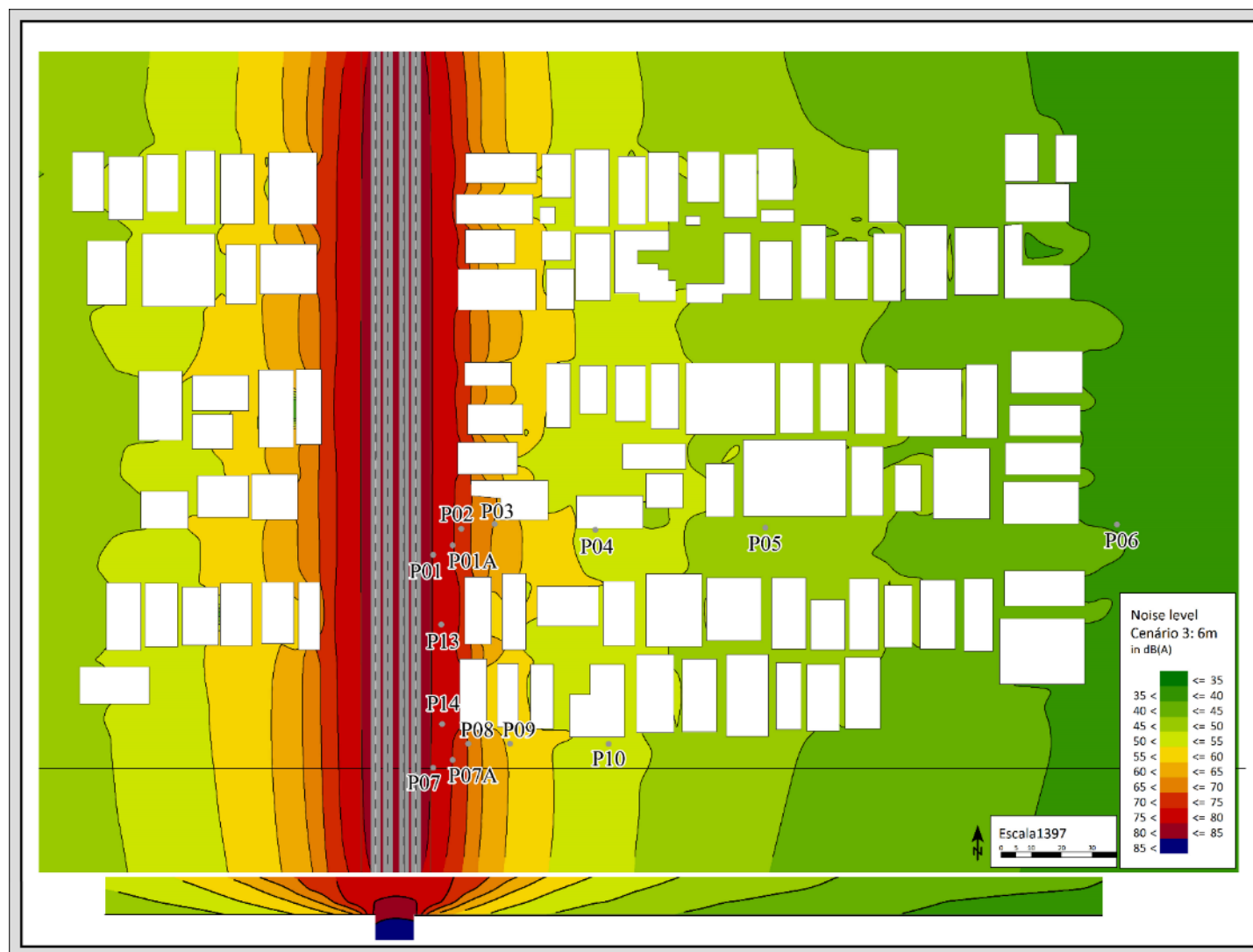
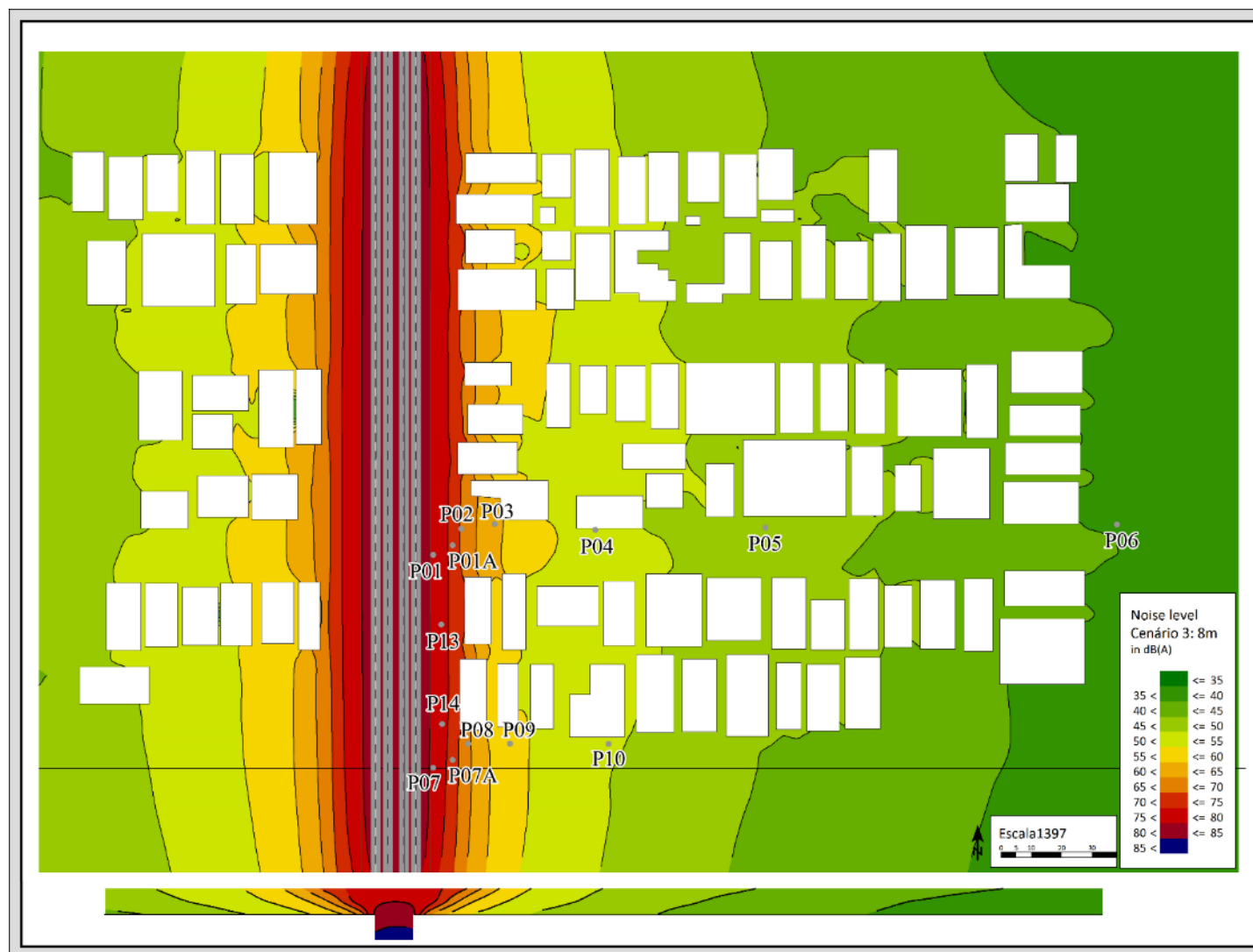


Figura 38: Mapa acústico do Cenário 3, passagem inferior com 6 m de altura.



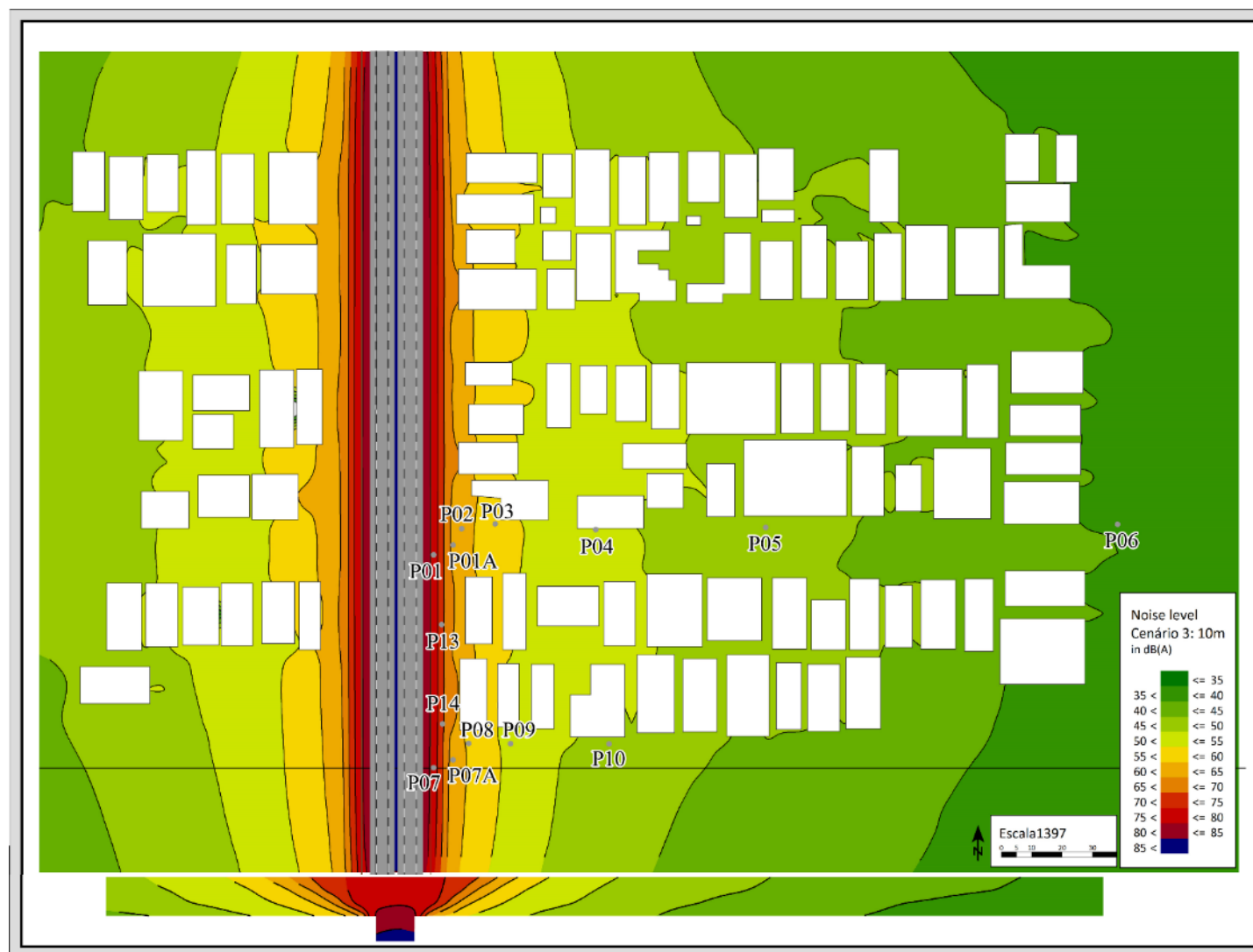


Figura 40: Mapa acústico do Cenário 3, passagem inferior com 10 m de altura.

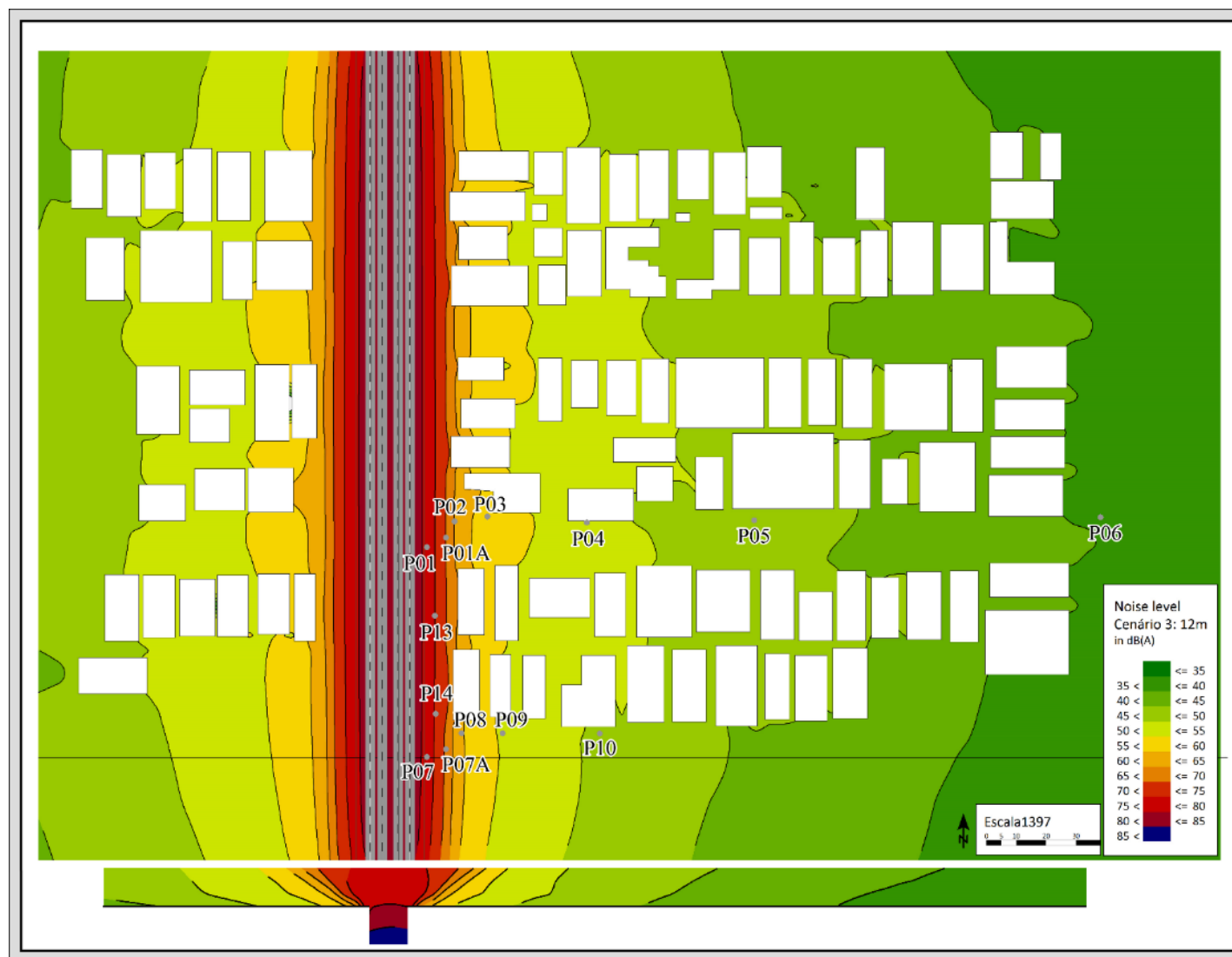


Figura 41: Mapa acústico do Cenário 3, passagem inferior com 12 m de altura.

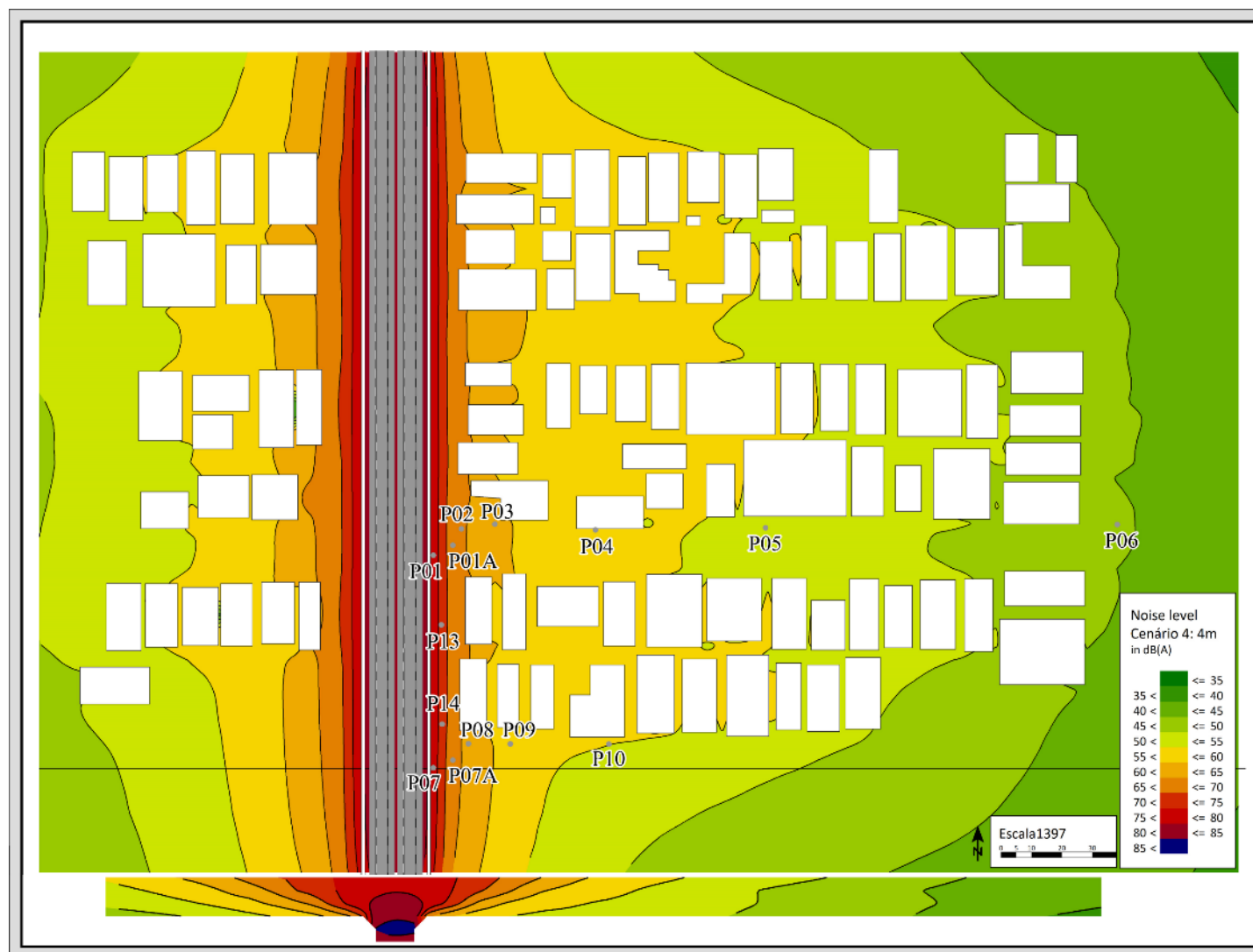


Figura 42: Mapa acústico do Cenário 4, passagem inferior com 4 m de altura.

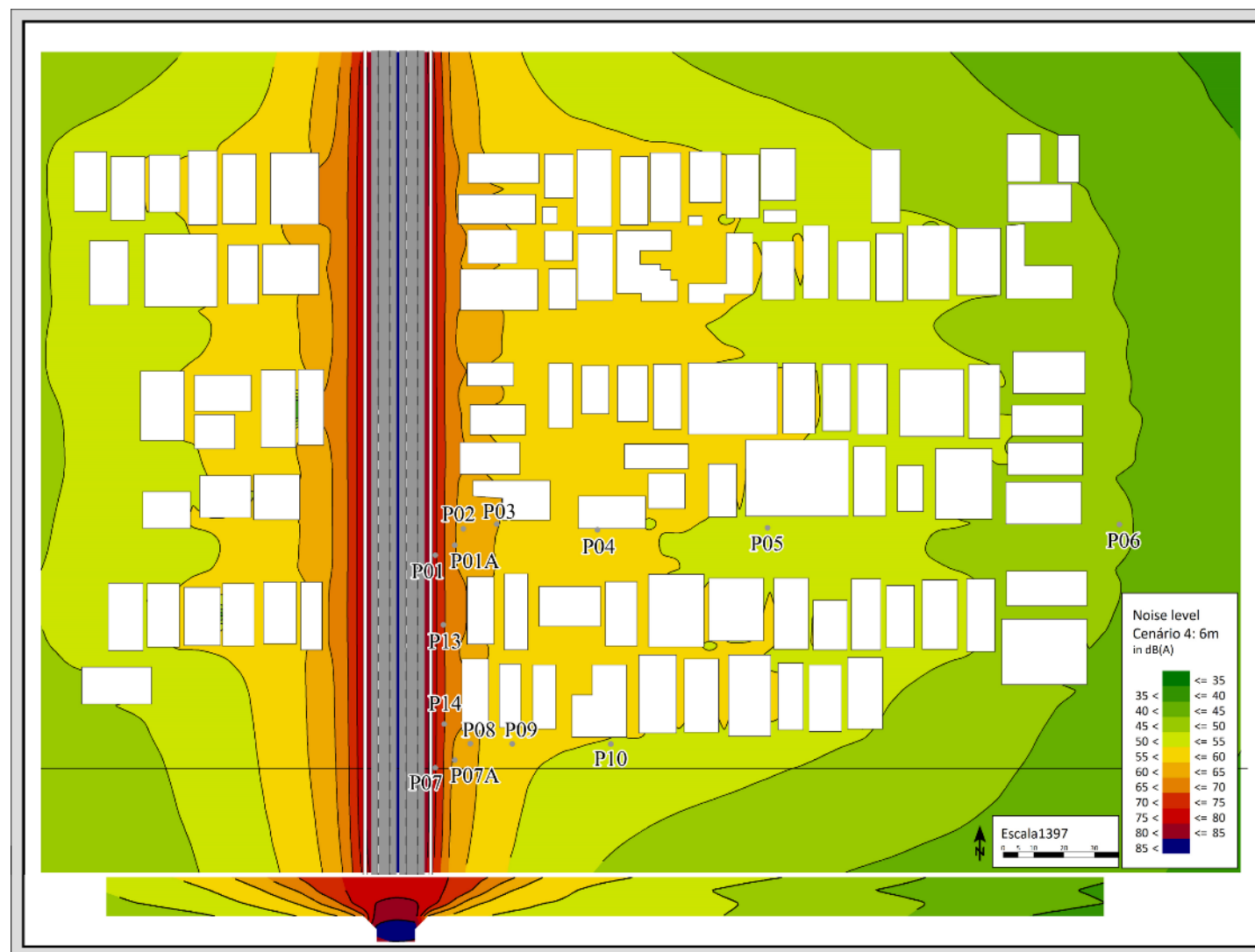


Figura 43: Mapa acústico do Cenário 4, passagem inferior com 6 m de altura.



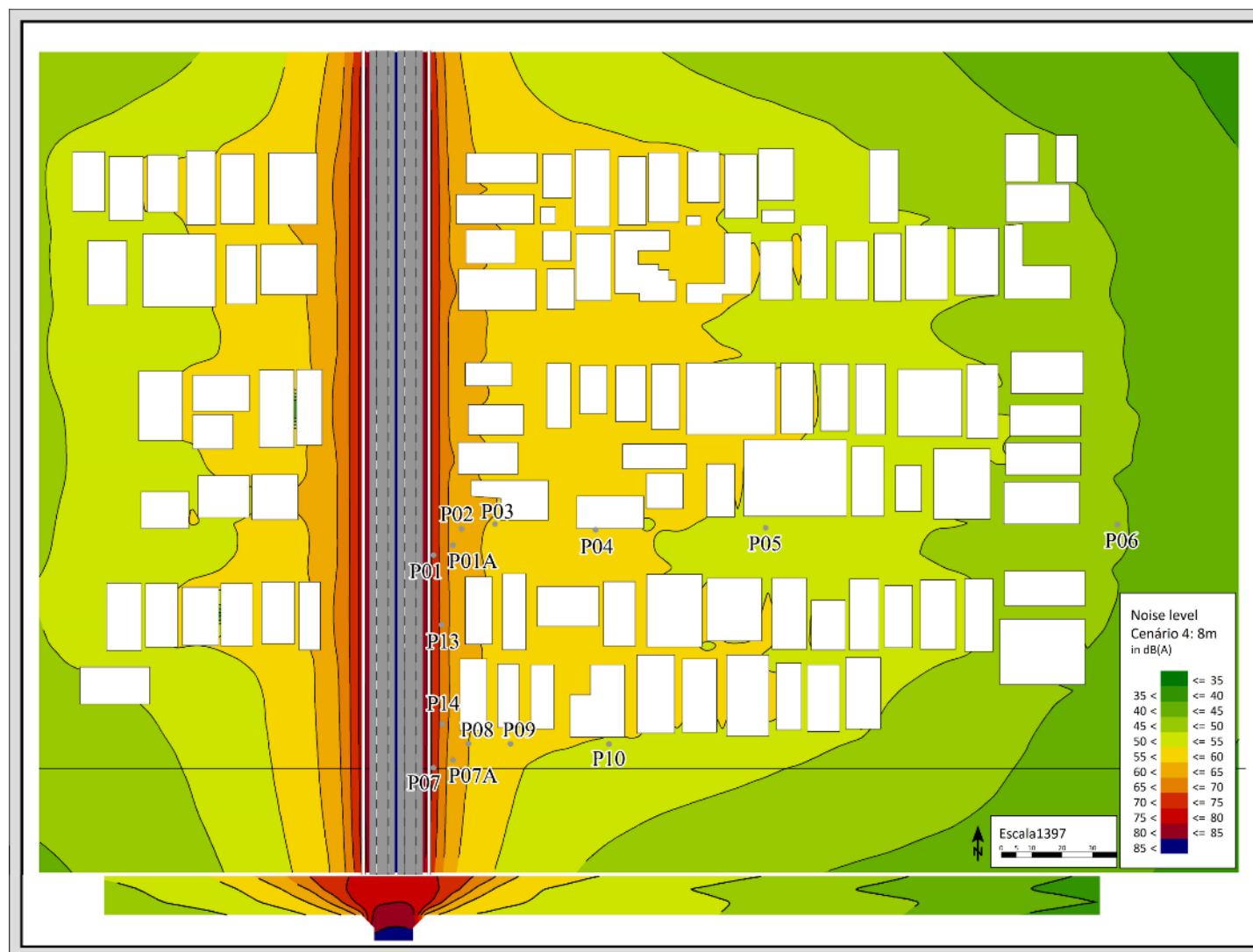


Figura 44: Mapa acústico do Cenário 4, passagem inferior com 8 m de altura.

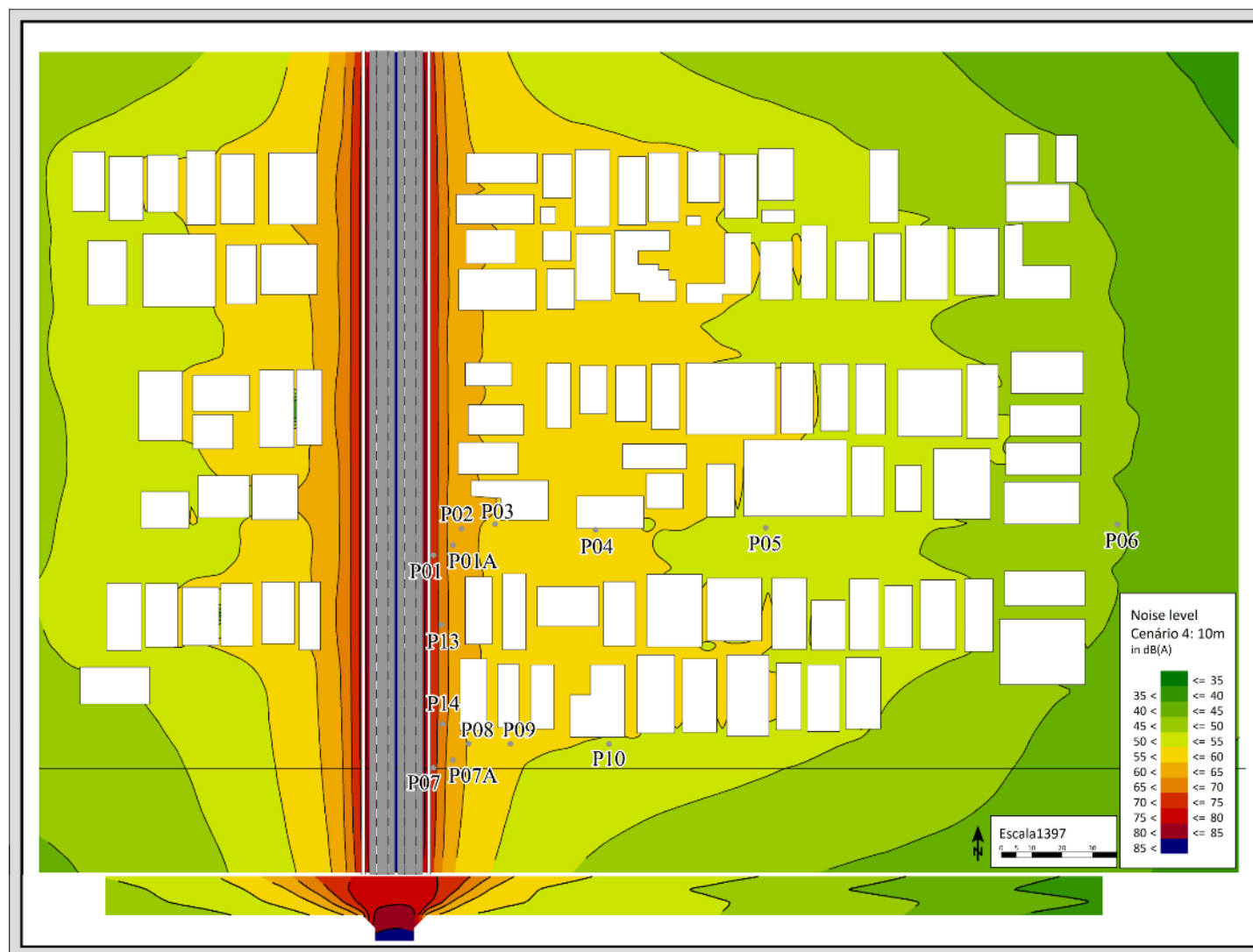


Figura 45: Mapa acústico do Cenário 4, passagem inferior com 10 m de altura.

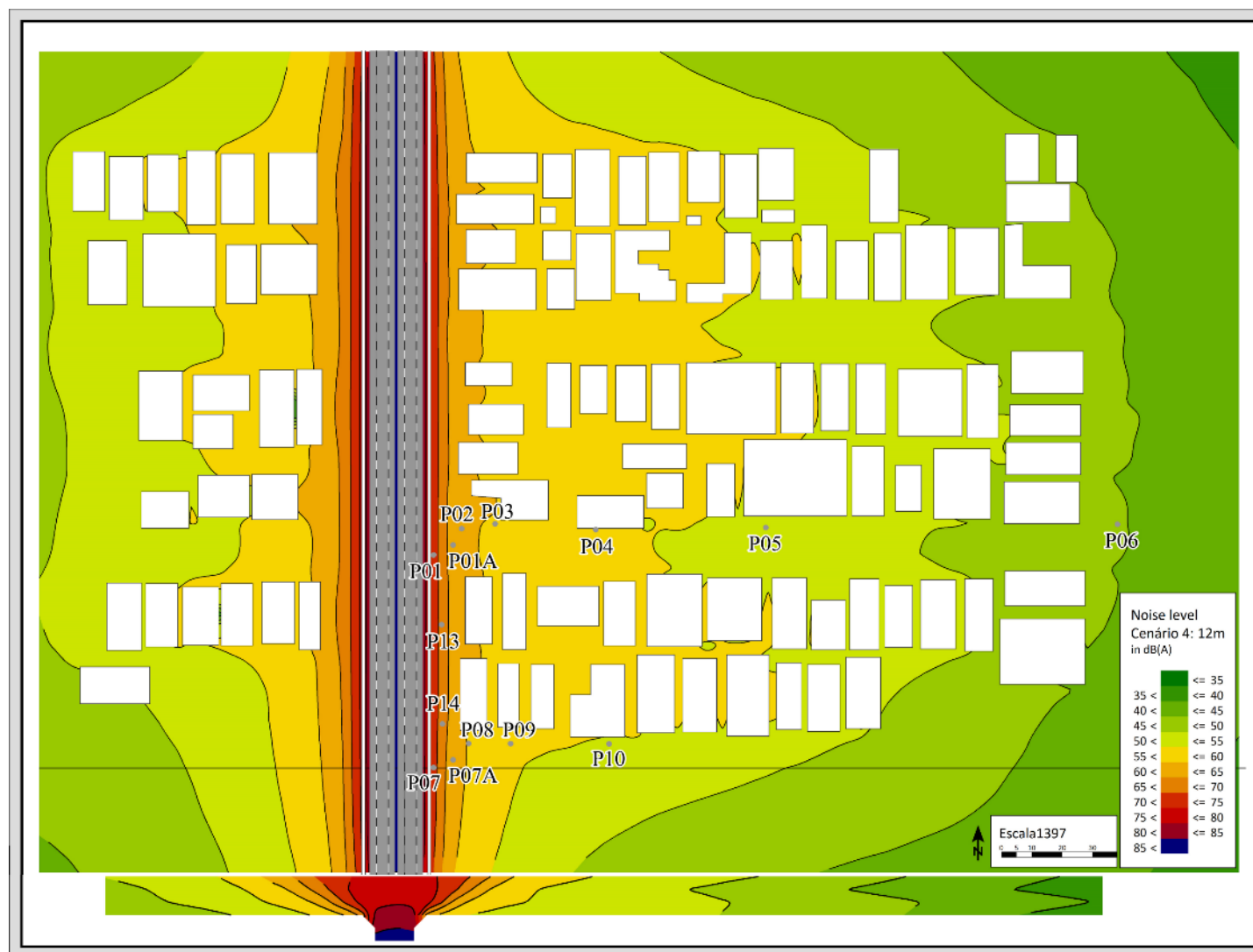


Figura 46: Mapa acústico do Cenário 4, passagem inferior com 12 m de altura